

THÈSE

présentée en vue de
l'obtention du titre de

DOCTEUR

de

**L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
DE L'AÉRONAUTIQUE ET DE L'ESPACE**

**ÉCOLE DOCTORALE : Systèmes
SPÉCIALITÉ : Sciences cognitives**

par

Frédéric DEHAIS

Modélisation des conflits dans l'activité de pilotage.

Soutenue le 24 mai 2004 devant le jury :

MM.	R.	AMALBERTI	Président
	L.	CHAUDRON	Directeur de thèse
	C.	KOLSKI	Rapporteur
	D.	NOVICK	
Mme	J.	PASTOR	
M.	B.	PAVARD	Rapporteur

Modélisation des conflits dans l'activité de pilotage

Dehais Frédéric

21 juin 2004

Remerciements

Cette thèse s'est déroulée dans d'excellentes conditions, grâce au climat particulièrement propice de l'Onera. Je tiens à remercier pour cela, Jean-Pierre Jung, directeur du centre de Toulouse pour m'avoir accueilli dans l'enceinte du centre, Claude Barrouil, directeur du département DCSD pour l'intérêt qu'il a manifesté pour mon travail de recherche mais aussi Jean-François Gabard et Dominique Tristran, qui m'ont ouvert les unités de recherche CD et PSEV.

Je souhaite remercier ceux qui m'ont fait l'honneur d'être les membres du jury et dont j'ai un grand respect pour leur qualité de chercheurs : René Amalberti en a été un président remarquable, Bernard Pavard et Christophe Kolski qui ont rapporté minutieusement mon manuscrit, Josette Pastor dont les travaux et conseils éclairés ont largement orienté la conduite de ma thèse, David Novick qui s'est déplacé spécialement du Texas pour participer à cette journée en amenant des États-Unis cet esprit si fin dans la critique, Florence Reuzeau, d'Airbus Industrie qui en qualité de membre invité a apporté dans ses remarques le double et précieux regard du chercheur et de l'industriel, et enfin Laurent Chaudron, mon co-directeur de thèse, qui depuis mon premier stage dans son équipe, a été un maître qui inspire, apporte la confiance en soi et donne l'envie de se dépasser sans relâche.

Catherine Tessier, mon directeur de thèse, s'est effacée de mon jury pour me permettre d'avoir chacune des personnes citées ci-haut pour examinateurs. Cette abnégation n'est pas la seule de ses qualités. Il faudrait rajouter l'intelligence, l'honnêteté, le sens de l'engagement, l'ouverture d'esprit, la gentillesse et le dévouement. Merci pour tout.

Merci également à tous les membres du DCSD de Toulouse et de Salon-de-Provence et tout particulièrement à Patrick Le Blaye, qui a précieusement apporté ses connaissances, son temps et transpiré en mettant les " mains dans le cambouis " pour adapter l'environnement Lips/E-lips afin que je puisse réaliser ces premières expérimentations et obtenir les résultats de cette thèse.

Il me faut évidemment remercier la bande sympathique de pirates de l'air que constitue la communauté des pilotes. Ils ont participé bénévolement aux expériences, avec le seul désir de contribuer activement à la recherche scientifique, dans un esprit mélangeant curiosité, sérieux, et amusement. Cela aura

été un réel plaisir de côtoyer ces gens qui préservent le plus vieux rêve de l'humanité : voler.

Pour faire une thèse et ne pas devenir cinglé, il faut des amis. Cela aide pragmatiquement à remettre les pieds sur terre. J'en ai de toutes sortes, des grands, des petits, des bruns, des blonds, des sportifs, des mous, des enthousiastes, des artistes, des nihilistes ou des passionnés qui sont des lève-tôts ou des couche-tards, qui font des enfants ou qui restent enfants, qui vivent dans des îles merveilleuses ou dans des capitales enfumées, qui aiment ou n'arrivent pas à aimer, pour qui la vie est simple ou pour qui tout est tellement compliqué. Merci. Dans ce kaléidoscope, vous vous reconnaîtrez probablement et si les choix que nous avons fait dans nos vies nous ont en partie séparé, cela ne change rien : je vous porte tous en moi à chaque instant.

Le fait premier d'une famille est que contrairement à l'amitié on ne la choisit pas. On n'est pas nécessairement tenté de s'entendre avec tout le monde, surtout dans une famille aussi pléthorique que la mienne, où je n'ai pas assez de doigts de mains, d'orteils et de petits doigts de pieds pour compter tout les cousins et cousines, oncles et tantes, petits enfants... Dans de tels cas, on s'attend à des effets de groupe, à l'isolement des individus déviants, à vivre à chaque instant un roman de François Mauriac, mais pourtant il est des exceptions que la psychologie sociale ne peut expliquer. Miracle ? Toujours est-il que je suis fier d'appartenir à cette famille, de pouvoir compter sur vous, de me fier aveuglément à vous, mes très jolies soeurs, mes beaux-frères, mes cousins et mes superbes cousines (les amis cités ci-haut en ont fait l'expérience...), mes oncles et tantes et ma fringante grand-mère.

Si je deviens chercheur, c'est parce que mes parents m'ont appris la curiosité. Mal leur en a pris, car gourmand comme un gosse devant un étalage de pâtisserie, j'ai voulu goûter à tout : jouer de la musique classique, du jazz, de la pop et de la musique électronique, lire, sortir, faire du foot, du tennis mais surtout du surf, voyager, apprendre les langues étrangères et faire une thèse. Comment avez vous eu l'énergie et la patience pour supporter chacune de ces frasques ? La dette contractée est énorme. Je ne peux que vous dédier cette thèse.

*Le cerveau, plein à craquer de machines, pourra-t-il encore
garantir l'existence du mince ruisselet de rêve et d'évasion ?
L'homme d'un pas de somnanbule, marche vers les mines
meurtrières, conduit par le chant des inventeurs....*

René Char

Table des matières

Introduction	13
1 La sécurité en aéronautique	23
1.1 Introduction	23
1.2 Éléments de la sécurité aérienne	25
1.2.1 Réglementation aérienne	25
1.2.2 Équipements de bord	27
1.2.3 Formation	29
1.2.4 Le retour d'expérience	30
Rapports d'accidents	31
Rapports d'incidents	31
Analyse systématique des vols	32
1.3 Vers une approche anthropocentrée de la sécurité aérienne . . .	33
1.3.1 L'approche ingénierique : l'automatisation	33
1.3.2 L'approche de l'ergonomie	34
Modèles cognitifs de l'opérateur humain : principes . . .	35
1.3.3 Application de ces principes à la sécurité aérienne	37
Procédures et check-lists	37
La formation : le tuteur intelligent	38
Le retour d'expérience	38
Équipements de bord : l'assistance au pilotage	40
1.3.4 L'apport des neurosciences	43
1.4 Conclusion	45

2	Conflit	47
2.1	Introduction	47
2.2	Préambule sur le conflit	48
2.2.1	Psychologie sociale	48
2.2.2	IA, IAD/SMA	49
2.2.3	Ergonomie	50
2.3	Aspects structurels du conflit	52
2.3.1	Notion de conflit et d'agents	52
2.3.2	Notion de conflit et de buts	52
2.3.3	Typologie des conflits	53
2.3.4	Conditions structurelles d'existence du conflit	54
2.4	Aspects psychologiques du conflit	55
2.4.1	Le modèle de Lewin	55
2.4.2	La dissonance cognitive	56
2.4.3	Expérience de Sherif [Sherif et Sherif, 1953]	57
2.5	Résolution du conflit	58
2.5.1	Réduction du conflit : le compromis	58
	Compromis dans le conflit intra-agent	58
	Compromis dans le conflit inter-agents	59
2.5.2	Élimination du conflit	59
2.5.3	Détournement du conflit	60
2.6	Conclusion	61
3	Persévération	63
3.1	Introduction	63
3.2	Théorie de la persévération	64
3.2.1	Approche sociologique de la persévération	64
3.2.2	Bases cognitives de la persévération	66
3.2.3	Bases neurologiques de la persévération	67
3.2.4	Persévération et théorie de l'inhibition	69
3.3	Conflit et persévération	70
3.3.1	Explication neuropsychologique : le stress	70

3.3.2	Explication psychologique : le sentiment de perte	71
3.4	Des solutions pour empêcher la persévération	71
3.5	Conclusion	72
4	Modélisation des conflits dans l'activité de pilotage	75
4.1	Introduction	75
4.2	Vers une définition du conflit	77
4.2.1	Conflit et agents	77
4.2.2	Conflit et buts impossibles	78
4.2.3	Conflit et conséquences	79
4.2.4	Vers une définition informelle du conflit	80
	Définitions	80
	Remarque	80
4.3	Modélisation des conflits : application à l'aéronautique	81
4.3.1	Préambule	81
4.3.2	Modélisation des connaissances	82
	AP_but	82
	AP_plan	82
	AP_cruciale	83
	AP_observation	84
4.3.3	Détection de conflit	84
	Détecter les ensembles d'AP qui ne sont pas cohérents .	85
	Identifier les conflits	87
	Identification du conflit	87
4.4	Conclusion	88
5	Première validation expérimentale du modèle des conflits	89
5.1	Introduction	89
5.2	Expérimentations	90
5.2.1	Avant propos	90
5.2.2	Environnement expérimental	90
5.2.3	Généralités sur les scénarios	92
5.2.4	Scénario d'entraînement	93

5.2.5	Scénario expérimental : la mission Ravitaillement	93
5.2.6	Déroulement des expérimentations	94
	Accueil des pilotes	95
	Entraînement	95
	Présentation du scénario “ Ravitaillement ” et vol	95
	Debriefing	95
5.3	Analyse de l’activité de pilotage	95
5.3.1	Le modèle de référence	96
5.3.2	Modélisation de l’activité observée de pilotage	97
	Altitude	97
	Cap	99
	Point tournant sélectionné, position de l’avion	100
	Carburant et position de l’avion	100
	AP_observation	100
5.4	Résultats	101
5.4.1	Conflit 1 : conflit de représentation sur le point 5	102
	Détection des ensembles d’AP qui ne sont pas cohérents	104
	Détection de l’ensemble d’AP conflictuel	105
5.4.2	Conflit 2 : conflit de représentation sur le point 9	105
	Détection des ensembles d’AP qui ne sont pas cohérents	107
	Détecter de l’ensemble d’AP conflictuel	108
5.5	Discussion	109
5.5.1	Réflexion sur la persévération	109
5.6	Conclusion	110
6	Ghost : environnement expérimental de contre-mesures cognitives	113
6.1	Introduction	113
6.2	Contre-mesures cognitives	114
6.2.1	Définition des contre-mesures	114
6.2.2	Principe des contre-mesures cognitives	115
	Conception des contre-mesures : le retrait d’information	115
	Exemple de contre-mesure cognitive	116

	Justification théorique du retrait d'information	116
6.3	Ghost	117
6.3.1	Le simulateur de vol : FlightGear	118
	Modifications apportées au simulateur de vol FlightGear	118
6.3.2	Atlas	119
6.3.3	L'interface du "magicien d'Oz"	120
	Page 1 : modification des paramètres de l'avion	122
	Page 2 : dégradation météorologique	123
	Page 3 : suivi sur carte	123
	Page 4 : envoi de messages	124
	Page 5 : les contre-mesures	125
6.4	Conclusion	126
7	Deuxième expérimentation	129
7.1	Introduction	129
7.2	Principe des expériences	130
7.3	Scénarios expérimentaux	130
7.3.1	Scénario 1	130
7.3.2	Scénario 2	131
7.3.3	Scénario 3	132
7.3.4	Synthèse sur les scénarios	133
7.4	Contre-mesures cognitives	134
7.4.1	Contre-mesures cognitives pour les scénarios 1 et 2	135
7.4.2	Contre-mesures pour le scénario 3	137
7.5	Déroulement des expérimentations	137
7.5.1	Accueil des pilotes	137
7.5.2	Entraînement	137
7.5.3	Présentation des scénarios et vol	138
7.5.4	Debriefing	138
7.6	Résultats	139
7.6.1	Résultats pour les scénarios 1 et 2	140
	Condition 1 : sans contre-mesures	140

Condition 2 : avec contre-mesures	141
7.6.2 Résultats pour le scénario 3 : “la panne”	142
7.6.3 Remarques sur les contre-mesures	143
Contre-mesures par clignotement	143
Contre-mesures par disparition totale d’un cadran	144
7.6.4 Contre-mesures et alarmes	144
7.6.5 Point de vue des pilotes	145
7.6.6 Détection de conflit	146
Connaissances du Pilote6	146
Activité observée du Pilote6	146
Détection des incohérences du Pilote6	146
Détection du conflit	147
7.7 Discussion	147
7.7.1 Commentaires sur les conflits	147
7.7.2 Critique des expérimentations	149
Le conflit	149
Contre-mesures	149
7.8 Ghost : vers un nouveau système d’aide au pilotage	150
7.8.1 La détection de conflit	151
7.8.2 Les contre-mesures	151
7.9 Conclusion	152
Conclusion	155
Perspectives	161
Bibliographie	168

Introduction

Préambule : de l'erreur humaine au conflit

L'objet de cette thèse est de réaliser une contribution théorique et pratique sur la problématique de l'erreur humaine en aéronautique. Cette contribution s'inscrit dans les thèmes précis de l'aide au pilotage et de la prédiction de dégradation de l'activité des pilotes. Pourtant s'il est relativement aisé de déterminer *a posteriori* l'enchaînement de causes et d'erreurs qui ont conduit à un accident, en revanche la prédiction *in situ* d'un accident aérien sur la base de la détection des erreurs de pilotage reste problématique. Cela tient à deux problèmes épistémologiques auxquels se heurtent l'étude de l'erreur : celui de son existence, et celui de son statut. À partir d'une argumentation sur ces deux caractéristiques de l'erreur, nous souhaitons justifier dans cette introduction l'utilisation du concept principal de cette thèse pour prédire la dégradation de la performance humaine : le conflit.

De l'existence de l'erreur

Le problème de l'existence de l'erreur remonte à l'antiquité où les philosophes classiques s'interrogent sur sa possibilité car elle conduit au dilemme : l'erreur est possible (la preuve, on se trompe) or il est impossible d'en rendre compte, car comment comprendre un discours qui exprime quelque chose qui n'existe pas. Le présupposé standard et évident de ces analyses classiques, c'est que la vérité est l'adéquation du discours à la chose. Si l'homme se trompe, c'est donc que son discours est faux, et qu'il se rapporte à un non-être ; ce qui est, selon les conceptions de l'époque, inconcevable. Si ces questionnements ont été en partie résolus, ils soulèvent encore des interrogations pratiques : quand sait-on que l'on a fait une erreur, quand sait on qu'elle existe ? C'est en observant entre autres les résultats d'une action qu'elle devient manifeste, c'est-à-dire par une prise de conscience : l'existence de l'erreur se définit *a posteriori*. De plus, peut-on parler d'erreurs si celles-ci ne sont pas des fautes, c'est-à-dire si elles n'ont pas porté à conséquence [Giroud-Fliegner, 2001] ?

Étymologiquement [Picoche, 1994], l'erreur vient du latin *error* et *errare* qui signifient que l'on s'éloigne du chemin de la vérité, c'est-à-dire d'un référent, qui est par exemple chez Descartes [Giroud-Fliegner, 2001] mais encore aujourd'hui en linguistique, celui de la logique. L'erreur est donc un écart par rapport à une norme [Leplat, 1985]. Mais nous voilà bien avancés : la norme est labile et *ad hoc*, elle n'a pas de caractère universel. Lors de l'effondrement du troisième Reich et dans les territoires sous contrôle soviétique, la norme qui proscrivait le communisme bascule, et c'est le fascisme qui devient l'erreur¹. La norme dépend des sociétés ou du système auquel un individu appartient. En ergonomie, on montre que les normes sont réinterprétées et adaptées individuellement [Leplat, 1997 ; Leplat et Hoc, 1983]. Dans ces situations de travail, l'erreur n'est plus considérée que comme un écart à l'intention de l'individu [Cellier, 1990 ; Reason, 1990]. Pour se persuader de cette variabilité, il suffit de constater dans l'Éducation Nationale la disparité de la notation d'une même copie par deux enseignants et ce, même dans des disciplines formelles comme les mathématiques.

Du statut de l'erreur

Nombreuses sont les tentatives pour éradiquer l'erreur, depuis Platon dans *l'Allégorie de la caverne*, Descartes dans son *Discours de la méthode* ou plus récemment à travers le relativisme qui admet que deux thèses puissent se contredire et être vraies en même temps². Pourtant même cette tentative moderne échoue car elle s'auto-réfute [Engel, 2000] : " dès lors que le relativisme admet que deux thèses contradictoires peuvent être vraies relativement à deux perspectives, il doit aussi admettre qu'il existe une perspective selon laquelle deux thèses contradictoires ne peuvent être vraies, contrairement à son hypothèse. " Il faut pourtant admettre que l'erreur est inéluctable, naturelle : l'ergonomie montre que dans les situations de travail, les opérateurs (ex : pilote, conducteur de trains), commettent inmanquablement des erreurs mais en récupèrent la plupart [Rizzo *et al.*, 1987]. Bien au contraire, cette production-détection-récupération de l'erreur constitue un véritable trait d'expertise [Alwood, 1984].

Mais alors quel est le statut de l'erreur ? Négatif certes, lorsqu'une erreur conduit à un accident, mais il est aussi positif car l'utilisation de l'erreur :

- est un processus intrinsèque dans l'apprentissage de connaissances [Giroud-Fliegner, 2001] ;

¹Bien plus tard, on le sait, lors de la chute du mur, les anciens hauts fonctionnaires communistes, comme ceux ayant appartenu à la *Stasi*, sont évincés à leur tour et n'ont plus le droit de travailler dans la fonction publique dans l'Allemagne réunie.

²Un exemple bien connu est celui de la dialogique corpusculaire et ondulatoire de la lumière.

- est une condition pour l'évolution de la connaissance : depuis Bachelard et Popper, nous savons qu'une théorie est dite scientifique si elle est faillible et que le savoir ne s'acquiert qu'en surmontant des barrières épistémologiques [Coudarcher, 1997] ;
- est un moyen important dans l'auto-évaluation de sa performance : c'est au regard de ses erreurs que l'on peut estimer si une connaissance est apprise, comprise. De plus dans le domaine de la conduite (conduite automobile, pilotage d'avion...), le nombre d'erreurs commises joue un rôle de *feedback* et permet d'estimer sa performance (ex : fatigue) [Wioland, 1997] ;

Enfin, dans la plupart des disciplines, l'appropriation de l'erreur est reconnu comme un instrument de la création. En sciences, de nombreuses découvertes sont l'œuvre d'un heureux hasard, d'une erreur de manipulation ; la plus célèbre étant sans équivoque celle des antibiotiques par Flemming. Dans le domaine artistique, son apparition inspire. Le peintre Bacon [Bacon, 1996] raconte à propos de son art : " *il était prévu quelque chose, et puis, d'une façon tout à fait étonnante, quelque chose d'autre est arrivé. C'est à la fois accidentel et en même temps complètement évident* ". En ergonomie, il est admis que ce sont des erreurs qui permettent parfois de trouver de nouvelles procédures, plus efficaces, plus sûres [Chaudron *et al.*, 2000d ; Chaudron *et al.*, 1999].

Il convient donc de reconnaître à l'erreur la même importance, le même statut que la vérité [Engel, 2000].

Le conflit : une autre façon d'étudier l'erreur

Le propos essentiel de cette thèse est d'apporter une contribution théorique et pratique à la sécurité en aéronautique. Nous cherchons à définir une méthode et des outils pour identifier des précurseurs de la dégradation de l'activité de pilotage et à mettre en œuvre des moyens pour empêcher la détérioration des interactions pilote-système. Mais au regard de ce que nous avons rapporté jusqu'ici, nous sommes en mesure de nous demander si la modélisation de l'erreur constitue une approche nécessaire et suffisante pour rendre compte de l'état de dysfonctionnement d'un système hommes-machines :

- son apparition n'est pas synonyme de dégradation de l'activité des pilotes ;
- son existence se révèle souvent *a posteriori*, une fois qu'un incident ou un accident a eu lieu ;
- sa formalisation est hasardeuse puisque la notion de norme à laquelle elle se rattache n'est pas universelle.

Au contraire, l'étude du conflit en psychologie sociale [Le Marc, 1999 ; Castelfranchi, 2000 ; Simmel, 2003] montre que sa présence est révélatrice d'une dynamique de tension et d'opposition au sein d'une société ; en intelligence artificielle distribuée, son apparition permet de diagnostiquer un état de dysfonctionnement dans les interactions entre les agents artificiels [Dehais et Pasquier, 2000]. Une objection pourrait être de considérer le point de vue de Simmel [Simmel, 2003] sur le rôle positif et finalement cristallisateur du conflit. Sans le nier, il faut pourtant considérer que ce mécanisme positif est un processus à long terme, qui se réalise une fois les tensions apaisées, une fois les crimes pardonnés, une fois la paix faite avec l'ennemi, comme le suggèrent les travaux de Sherif [Sherif et Sherif, 1953]. En revanche à court terme, le conflit engendre des comportements tels que :

- l'inhibition [Lewin *et al.*, 1939] ;
- l'agressivité [Sherif et Sherif, 1953] ;
- l'exclusion, l'incompréhension [Simmel, 2003].

Dans le domaine du pilotage d'avions, qui relève du court terme, le conflit semble donc être un indicateur approprié pour évaluer l'état des interactions entre les différents agents (pilote, copilote, contrôle aérien, interfaces embarquées). Par ailleurs les comportements qu'il génère (violence, exclusion, persévération...) sont particulièrement dangereux dans le cadre du pilotage, où la coopération entre les différents acteurs est garante d'une sécurité optimale.

Ensuite, d'un point de vue formel, ce concept est plus intéressant que l'erreur : il ne se rapporte pas systématiquement à un référentiel. Le conflit peut effectivement être relatif à une norme et en ce sens on se retrouve confronté aux mêmes problèmes rencontrés avec l'étude de l'erreur. Mais il peut exister dans l'absolu en dehors de toute morale, ou de toute vérité : son essence est la contradiction [Castelfranchi, 2000], la différence entre deux points de vue [Chaudron *et al.*, 2000b]. Ainsi, il apparaît possible de le détecter en se concentrant sur l'analyse de phénomènes d'opposition, d'interférence ou d'incohérences comportementales entre plusieurs agents.

Objectifs et plan de la thèse

Le raisonnement que nous venons d'effectuer est le point de départ d'une question à laquelle cette thèse s'efforce de répondre : le conflit est-il un concept pertinent pour l'étude de la sécurité aérienne ? Autrement dit, le conflit permet-il de prévoir la dégradation de l'activité de pilotage et de l'expliquer par l'apparition de comportements endémiques ? Enfin, est-il possible de définir des outils d'assistance pour aider les pilotes à faire face au conflit ?

Pour apporter des éléments de réponses, notre démarche s'articule autour de trois axes :

- définir un modèle des conflits ;
- développer un environnement expérimental pour valider ce modèle et reproduire en laboratoire des situations de conflits pour mieux comprendre la dégradation de l'activité et identifier des comportements endémiques ;
- concevoir des moyens, ou contre-mesures, pour pallier ces comportements et aider à la résolution du conflit.

Ensuite, l'approche que nous suivons s'inscrit dans un esprit de transdisciplinarité et de pluridisciplinarité. Transdisciplinarité, tout d'abord, car le conflit est un concept transversal qui a des fondements formels, biologiques, psychologiques et sociologiques. Pluridisciplinaire, ensuite, car pour l'identifier et le résoudre nous utilisons des théories, des méthodes et des outils issus de l'intelligence artificielle, de la psychologie expérimentale, de l'ergonomie et de la neuropsychologie.

Un tel projet est ambitieux, et nous n'avons pas la prétention d'apporter une réponse complète à la question posée. Le principe qui anime cette thèse est de relever des concepts, de les justifier et de les tester en partie pour susciter une réflexion sur les moyens d'étude du conflit et de prévention de ses conséquences dans l'activité de pilotage.

Chronologie et plan de la thèse

Le plan proposé pour le document ne suit pas exactement le cours chronologique de cette thèse : nous avons tout d'abord défini un modèle des conflits que nous avons ensuite testé lors d'expérimentations avec des pilotes. C'est au cours de ces expériences que nous avons mis en évidence l'apparition d'un comportement - la persévération - lorsque les pilotes sont confrontés au conflit.

Cette constatation nous a ensuite amené à réaliser une recherche bibliographique sur la persévération dans le but de dégager une sémiologie et de comprendre le lien avec le conflit. La mise en relation de théories en psychologie sociale, neuropsychologie et de résultats en ergonomie a permis de définir des contre-mesures destinées à pallier ce comportement des pilotes.

Par la suite, un environnement de simulation - Ghost - a été mis au point pour étudier en laboratoire la persévération et tester nos hypothèses sur les contre-mesures. Ainsi une deuxième série d'expérimentations a pu être conduite pour montrer l'intérêt de notre approche.

Dans un souci d'académisme, nous ne souhaitons pas présenter un manuscrit qui suit la chronologie de cette thèse. Nous nous devons d'introduire les notions théoriques de conflit puis de persévération avant de poser nos propres hypothèses et de décrire nos travaux empiriques.

Chapitre 1 : la sécurité en aéronautique

L'objet de ce premier chapitre est de dresser un état de l'art sur la sécurité en aéronautique pour en comprendre les enjeux. Nous abordons les éléments sur lesquels repose la sécurité aérienne : la réglementation, la formation, les équipements de bord et les moyens de retour d'expérience qui permettent d'observer quotidiennement la réalité des opérations, d'identifier les risques, de développer et de mettre en œuvre des politiques pour les corriger. Ensuite, pour situer notre approche avec l'existant, nous examinons les solutions apportées dans les milieux technologiques de conception notamment en discutant des avantages et inconvénients de l'automatisation, mais aussi les théories prônées par l'ergonomie qui démontrent l'importance des approches anthropocentrées pour une meilleure performance du système aérien dans son ensemble.

Chapitre 2 : du conflit

Ce chapitre dresse un état de l'art sur la notion de conflit en s'appuyant sur les approches de la psychologie sociale, de l'intelligence artificielle et de l'ergonomie. Le constat premier est que cette notion ne possède pas de véritable identité formelle et qu'il existe une certaine confusion entre le conflit *per se* et sa résolution. Une des raisons est que l'on s'intéresse traditionnellement plus au concept de coopération pour des raisons d'ordre épistémologique (en sciences sociales) et pratique (en IA et en ergonomie). Ensuite les enjeux particuliers de chaque discipline font que chacun apporte sa vision du conflit en fonction de ses objectifs, comme en intelligence artificielle ou en ergonomie de conception où le conflit est la plupart du temps assimilé au dysfonctionnement. Pourtant dans la perspective d'avoir une vision clarifiée de ce concept, nous nous concentrons sur l'approche structurelle de Castelfranchi qui propose des critères pour identifier le conflit. Nous examinerons ensuite des travaux empiriques en psychologie sociale afin de dégager les aspects affectifs du conflit. Enfin, nous passons en revue les différentes techniques pour résoudre le conflit. Cet état de l'art constitue une base pour une synthèse qui débouchera (chapitre 4) sur une définition et une modélisation générique du conflit.

Chapitre 3 : persévération

Dans ce chapitre, nous examinons les différents points de vue théoriques sur la persévération au travers d'une revue des disciplines qui s'intéressent au facteur humain (sociologie, psychologie, ergonomie, neuropsychologie) pour mieux comprendre ce comportement. Bien que les appellations diffèrent d'une

discipline à une autre, les explications sur cette attitude sont convergentes et permettent de dégager une sémiologie : la persévération est une focalisation exclusive du raisonnement et de l'attention sur la réalisation d'un but, même si celui-ci est dangereux pour la sécurité. Dans le même esprit pluridisciplinaire, nous tentons d'apporter des explications pour comprendre le lien entre le conflit, tel que nous l'avons défini, et la persévération.

Chapitre 4 : modélisation des conflits dans l'activité de pilotage

Dans ce chapitre, nous justifions l'étude du conflit dans l'activité de pilotage en nous appuyant sur la revue d'accidents tant militaires que civils qui indique que son apparition dans la gestion du vol est un précurseur remarquable de la dégradation de l'activité des équipages.

Ensuite, nous proposons une définition générique du conflit à partir des théories existantes en intelligence artificielle, en psychologie et en sociologie. Ainsi nous verrons que la modélisation du conflit ne peut se limiter à la seule notion d'incohérence formelle mais qu'elle nécessite également de prendre en compte les conséquences de cette incohérence. L'idée que nous défendons consiste à considérer le conflit comme l'impossibilité pour un agent ou un groupe d'agents d'atteindre un but qui a une importance. Chaque point de notre argumentation s'articule autour de l'analyse de conflits dans l'activité de pilotage qui ont conduit à des accidents.

Chapitre 5 : premières expérimentations

L'objectif de ce chapitre est de mettre en œuvre le modèle des conflits en l'éprouvant dans une situation expérimentale de pilotage d'avion. Dix pilotes sont placés successivement dans un environnement de simulation et ont pour tâche de réaliser une navigation au vu d'un plan de vol et en respectant des contraintes de carburant.

Pour pouvoir mener cette expérimentation, on se place dans le cadre du suivi de situation pour détecter l'apparition de conflit conformément aux idées développées au chapitre précédent. L'analyse de l'activité des pilotes et la détection de conflit est un processus qui se réalise ici *a posteriori* à partir des paramètres de vol récupérés lors de chaque simulation. Cela ne gêne en rien la démarche, au contraire : après chaque vol en simulateur, les pilotes sont interrogés lors d'un debriefing pour commenter leur vol, afin qu'ils expriment notamment s'ils se sont sentis en conflit ou non ; leurs verbalisations sont confrontées à l'analyse automatique de leur activité.

Au cours de ces simulations, nous identifions un comportement lié au conflit : la persévération. En fin de chapitre, nous proposons de détailler les deux cas où cette situation s'est produite en mettant en parallèle la modélisation des deux conflits et les explications respectives fournies par les pilotes sur leur attitude.

Chapitre 6 : Ghost, environnement expérimental de contre-mesures cognitives

L'idée maîtresse de ce chapitre est de présenter un concept pour contrer le mécanisme de persévération et de mettre en place des moyens pour le rendre opérationnel et le tester. Le concept est le retrait de l'information, seule façon apparente, et nous allons le voir à travers une argumentation, pour enrayer le mécanisme de la persévération. Un premier moyen est celui des contre-mesures, amené récemment en psychologie, pour mettre en œuvre ce principe de retrait d'information et en proposer plusieurs variantes. Le deuxième moyen est l'environnement expérimental Ghost, mis au point par notre équipe, qui est destiné à valider expérimentalement le retrait d'information. Le système Ghost est composé d'un simulateur de vol, d'un logiciel de suivi sur carte de l'appareil et d'une interface du magicien d'Oz. L'interface du magicien d'Oz offre la possibilité à un opérateur d'intervenir en temps réel durant les simulations. Elle permet de placer les pilotes dans des situations conflictuelles (panne, modification de la météorologie), d'enregistrer leurs activités pour une exploitation ultérieure, mais surtout d'envoyer des contre-mesures pour assister les pilotes.

Chapitre 7 : deuxième expérimentation

Nous présentons dans ce chapitre une expérimentation pour tester le principe des contre-mesures avec l'environnement Ghost exposé au chapitre précédent. Le principe est de placer sciemment les pilotes dans des situations conflictuelles destinées à les faire persévérer puis d'envoyer des contre-mesures pour évaluer leur capacité à rompre ce mécanisme d'obnubilation.

Trois scénarios sont élaborés et proposés indifféremment aux 22 pilotes qui participent à ces expériences. Bien que ces scénarios présentent des variantes propres, leur principe, conformément à nos hypothèses sur le conflit, réside dans l'impossibilité pour les pilotes de rejoindre un but crucial de la mission.

Nous examinons successivement les trois scénarios, les contre-mesures mises en œuvre dans ces expérimentations et la méthode expérimentale. Puis, les résultats des expérimentations sont commentés sur la base d'aspects tant

objectifs que subjectifs car il s'agit d'analyser l'efficacité des contre-mesures sur l'activité de pilotage, mais aussi d'exposer le ressenti des pilotes.

Chapitre 1

La sécurité en aéronautique

1.1 Introduction

Le transport aérien est le moyen de transport en plus forte expansion depuis quelques décennies : rapide, sûr, et bon marché depuis l'émergence progressive des charters et des compagnies dites " *low cost* ", il séduit de plus en plus de voyageurs. Cependant les utilisateurs demandent toujours une amélioration du niveau de sécurité et notamment que le nombre absolu d'accidents aériens diminue malgré une augmentation générale du trafic. Depuis les années 80, ce nombre absolu d'accidents qui est d'un accident tous les millions d'heures de vol est en fait en légère augmentation. Par ailleurs, en extrapolant à l'année 2010 la tendance mise en évidence sur les trente dernières années, les prévisions sont estimées à 1 accident par semaine pour l'aviation commerciale et trois accidents hebdomadaire pour les hélicoptères [Harris *et al.*, 2000]. Le tableau suivant résume les données chiffrées à titre d'illustration des accidents aériens civils dans le monde depuis 1996. Les accidents dus à des activités illicites (détournement) ne sont pas comptés, de plus à partir de 1997, tout accident d'aéronef dont la charge au décollage est inférieure à deux tonnes n'est plus considéré dans les décomptes.

Année	Nombre d'accidents	Nombre de victimes
1996	48	1614
1997	58	1227
1998	45	1115
1999	45	628
2000	39	1047
2001	42	781

Source : Bureau Enquête Accidents (<http://www.bea-fr.org>).

Quelles sont les causes des accidents aériens ? Bénéficiant des progrès techniques, d'un savoir-faire centenaire et d'une réglementation très exigeante pour la certification et le contrôle technique, les aéronefs sont fiables, et ne connaissent que très rarement des pannes qui remettent en cause la sécurité des équipages et des passagers. C'est l'opérateur humain (pilote, contrôleur...) qui est le plus souvent tenu comme le principal responsable de 70 à 80 pour-cent des accidents : des études [Boley, 1986 ; Veillette, 2001] tendent à montrer que le facteur humain est à l'origine de 70% des accidents civils, de 76% des accidents d'hélicoptères d'urgence médicale américaine et de 76% des accidents de l'armée américaine¹.

Or, déterminer qu'un incident ou un accident a pour origine une erreur humaine implique un jugement du comportement et des performances des opérateurs impliqués dans l'accident. Ce jugement, qui est influencé par un contexte social et psychologique, est réalisé retrospectivement et est invariablement biaisé par la connaissance des conséquences qu'ont eues les décisions et les actions des opérateurs [Woods *et al.*, 1994]. Par ailleurs, les statistiques qui stigmatisent le facteur humain, ne s'intéressent malheureusement pas aux nombreux incidents ou accidents évités par ces mêmes opérateurs humains. Enfin, il faut souligner le fait que si on remplaçait tous les pilotes par des systèmes automatiques, il n'y aurait certes plus d'erreur humaine, mais beaucoup d'accidents, étant donné les faibles capacités actuelles de perception, d'adaptation et de décision de ces automates.

Paradoxalement, la recherche scientifique, dont l'erreur est au centre de la démarche épistémologique, collabore activement avec les acteurs du secteur aérien (compagnies aériennes, constructeurs, organisme de réglementation...) sur la problématique de l'erreur humaine. Ainsi, le projet AVSP² lancé en 1997 par l'administration Clinton a comme objectif la réduction du taux d'accidents par un facteur 5 en dix ans et par un facteur 10 en vingt ans [Maille, 2003]. Sous l'égide de la NASA³, de la FAA⁴ et du ministère de la défense américain, des équipes, constituées de membres de ces administrations, d'experts de l'industrie aéronautique et de scientifiques, cherchent à développer des solutions technologiques susceptibles d'apporter une réponse adéquate à la sécurité en aéronautique.

La présente thèse s'insère également dans un programme de recherche pour l'amélioration de la sécurité aéronautique militaire et civile. De manière à avoir une meilleure compréhension de ce problème, d'en appréhender les en-

¹Bien que ces statistiques soient proches entre l'aviation civile et militaire, il convient cependant de nuancer l'interprétation de la similitude de ces résultats du fait que les contraintes opérationnels dans ces deux branches de l'aéronautiques sont très différentes.

²Aviation Safety Program

³National Aeronautics and Space Administration

⁴Federal Aviation Authority

jeux et les mécanismes, nous souhaitons aborder dans ce chapitre les éléments sur lesquels repose la sécurité aérienne : la réglementation, la formation, les équipements de bord et les moyens de retour d'expérience qui permettent d'observer quotidiennement la réalité des opérations, d'identifier les risques, de développer et de mettre en œuvre des politiques pour les corriger. Ensuite, nous examinerons les solutions apportées dans les milieux technologiques de conception notamment en discutant des avantages et inconvénients de l'automatisation, mais aussi les théories prônées par l'ergonomie qui démontrent l'importance des approches anthropocentrées pour une meilleure performance du système aérien dans son ensemble.

1.2 Éléments de la sécurité aérienne

La sécurité aérienne repose principalement sur la réglementation aérienne, l'équipement des aéronefs et la formation du personnel navigant. Ces trois éléments sont dans une interdépendance dynamique : régulièrement de nouveaux systèmes de vol sont introduits (ex : TCAS, système anti-collisions) qui imposent de former les pilotes mais aussi de faire évoluer la réglementation (ex : en cas de conflit entre les ordres du contrôle et du TCAS, seules les instructions du TCAS prévalent). Par ailleurs, la notion de réglementation internationale oblige les pays à harmoniser les formations et adapter les équipements des aéronefs aux normes de sécurité en vigueur.

Ainsi, dans cette section, nous aborderons ces questions de façon suffisante pour comprendre la politique sécuritaire en aéronautique. Le dernier point abordé est le retour d'expérience, élément clef pour surveiller et consolider l'édifice aéronautique et la sécurité en émettant des recommandations sur la formation, la réglementation et les équipements à partir de l'analyse systématique des événements aériens.

1.2.1 Réglementation aérienne

L'aéronautique est une activité très réglementée ; normes et procédures régissent l'exploitation de flotte ou des aéroports, le contrôle aérien et l'utilisation des aéronefs :

- la norme désigne “ l'ensemble de règles d'usage, de prescriptions techniques, relatives aux caractéristiques d'un produit ou d'une méthode, édictées dans le but de standardiser et de garantir le mode de fonctionnement, la sécurité et les nuisances ” [Rey-Debove et Rey, 1994] ;
- la procédure décrit “ l'ensemble des procédés utilisés dans la conduite d'une opération complexe ” [Rey-Debove et Rey, 1994].

La réglementation internationale pour l'aviation civile dépend de l'OACI (Organisation de l'Aviation Civile Internationale). Aux États-Unis, l'organisme de réglementation aérien est la FAA (Federal Aviation Authority). En Europe, un ensemble d'états obéissent à l'AESA (Agence Européenne de la Sécurité Aérienne⁵) qui a pour but l'harmonisation des règlements techniques et des procédures administratives en aviation civile. Dans ce cadre, des groupes d'experts élaborent les CS (Certification Specifications), anciennement JAR (Joint Aviation Requirement) pour réglementer ou certifier [SFACT, 2002 ; Sarazin, 2001] :

- les procédures de vol (ex : espacement minimal entre avions) ;
- l'exploitation et l'entretien des avions (ex : contrôle technique) ;
- la conception et la production des avions (ex : normes acoustiques) ;
- la formation des pilotes (ex : enseignement, compétence).

Chaque pays s'engage à les respecter et à les faire appliquer auprès des différents acteurs aéronautiques (constructeurs, contrôle aérien, compagnies...)⁶

Enfin, l'utilisation des aéronefs est soumise à des procédures et à des normes qui sont émises dans un premier temps par les constructeurs (ex : procédure de mise en route des moteurs, enveloppe de vol à respecter...) Par la suite [Degani et Wiener, 1993], les utilisateurs, c'est-à-dire les pilotes et leur compagnie les adaptent et rédigent des check-lists qui résument pas à pas l'activité des équipages pour chaque segment de vol. Ces procédures redéfinies doivent recevoir l'homologation par les organismes certificateurs. Ainsi la réglementation aérienne américaine (FAA 121.315) stipule que :

- chaque compagnie doit fournir une procédure approuvée pour chaque type d'appareil ;
- les procédures approuvées doivent comprendre tous les items nécessaires pour que les membres d'équipage puissent assurer la sécurité pendant le démarrage des moteurs, le décollage ou l'atterrissage et lors de pannes moteur ou de dysfonctionnement d'un système embarqué. La rédaction de ces procédures est telle qu'un membre d'équipage ne doit jamais faire appel à sa mémoire pour la vérification d'un item ;
- les procédures approuvées doivent être toujours disponibles dans le cockpit de chaque avion et l'équipage doit les suivre scrupuleusement lors du vol.

⁵Anciennement la JAA (Joint Aviation Authorities)

⁶En France, les services de la DGAC (Direction Générale de l'Aviation Civile) comme le SFACT (Service de la Formation Aéronautique et du Contrôle Technique), la DNA (Direction de la Navigation Aérienne) sont chargés de mettre en place et de surveiller l'application des JAR.

1.2.2 Équipements de bord

Aux premières heures de l'aéronautique, les pilotes dirigent leurs avions avec leur seule appréciation sensorielle. La première évolution pour le pilotage est l'intégration progressive d'instruments de vol dans la planche de bord. Lors du premier conflit mondial, l'avionique se standardise et comprend des cadrans analogiques tels que l'altimètre, l'anémomètre, l'horizon artificiel, le compas, le chronomètre, le tachymètre, le manomètre et la jauge à essence. L'ensemble de ces équipements de bord a pour fonction de fournir au personnel navigant une conscience de la situation [Endsley, 1995] sur la position et l'état de l'aéronef (ex : panne). Pour répondre aux besoins des militaires et des compagnies civiles, en 1929, cette conscience de la situation est " augmentée " par l'introduction du gyroscope qui autorise le vol aux seuls instruments.

La deuxième grande évolution est l'apparition de systèmes automatiques qui participent directement au pilotage de l'aéronef. Le but n'est plus de renseigner l'équipage, mais de l'aider en le soulageant d'une partie de la tâche de navigation. Au fur et à mesure que les aéronefs gagnent en performance (en altitude, vitesse, endurance), on note parallèlement une utilisation accrue de ces automates pour asservir l'appareil dans son ensemble. Un jalon important est atteint avec les générations récentes d'appareils de combat (ex : l'avion furtif F117) dits instables, c'est-à-dire que leur pilotage au sens propre ne peut plus être effectué par un homme. Des lois de commande permettent de contrôler des volets compensateurs répartis sur le fuselage et les plans fixes qui assurent en permanence la stabilité du vol [Dupont, 1994].

On le voit, l'adoption de nouveaux systèmes embarqués ou d'interface est liée davantage à l'idée de l'augmentation de la performance (voler plus vite, plus haut et par tous les temps) qu'à un réel souci d'amélioration de la sécurité, et comme le souligne Amalberti [Amalberti, 2002] : " *la préoccupation sécuritaire [pour l'équipement] a toujours été prise en compte mais de façon utilitaire, dans la mesure où les concepteurs voulaient faire faire plus à l'opérateur et que ce résultat était impossible sans risquer une multiplication des erreurs.* " Les deux figures suivantes illustrent ce propos : entre ces deux générations d'appareils, beaucoup de concepts en automatique et en IHM ont évolué. Ces changements ont modifié complètement la façon de piloter.



FIG. 1.1: Cockpit du Concorde : 3 hommes sont nécessaires pour faire voler cet appareil (pilote, copilote, mécanicien). L'interface pour contrôler le vol et les différents systèmes se fait par une multitude de cadrans analogiques.



FIG. 1.2: Cockpit de nouvelle génération dit " glass cockpit " : ces interfaces, plus synthétiques, permettent à deux hommes seulement de contrôler le vol et les différents automates. Les pilotes disposent d'outils de diagnostic de pannes, et la mise en route de l'appareil est facilitée : plus besoin de mécanicien...

1.2.3 Formation

L'étude des accidents en aviation commerciale, où le facteur humain est impliqué, montre que la dégradation de l'activité de pilotage trouve majoritairement son origine dans une mauvaise gestion des ressources par les membres de l'équipage [Billings et Reynards, 1984 ; Wiener, 1987]. Le terme ressource recouvre les trois notions de " *software* " (ex : information, procédures de vol), de " *hardware* " (ex : équipements, instruments de vol et de " *liveware* " (équipage, contrôle aérien) [Edwards, 1972]. Ainsi la gestion erronée de ces ressources correspond à [Sherman, 1997] :

- une mauvaise surveillance croisée entre membres de l'équipage ;
- une mauvaise répartition des tâches entre les membres d'équipage et les systèmes automatiques ;

- un rapport conflictuel entre les membres de l'équipage ;
- une rupture de communication entre les pilotes.

Introduit à la fin des années 80 [Amalberti, 2001], le C.R.M. (Cockpit ou Crew Ressource Management) a pour objectif de préparer les pilotes à mieux travailler en équipe dans l'objectif de [Merrit et Helmreich, 1996] :

- réduire la probabilité d'apparition d'erreur ;
- traiter l'erreur avant qu'elle ne dégrade la performance du système équipage/aéronef ;
- réduire les conséquences de ces erreurs.

Ce type d'entraînement est défini par Lauber [Lauber, 1984] comme un apprentissage destiné à utiliser " toutes les ressources disponibles - information, équipement, personnel - pour réaliser un vol efficace et en toute sécurité". La formation consiste à la fois en des cours magistraux en facteurs humains et en mises en situation en simulateur afin d'aborder d'un point de vue théorique et pratique les notions de commandement d'équipage, de communication, et de conflit [Amalberti, 2001].

1.2.4 Le retour d'expérience

Le retour d'expérience (*lessons learned* en anglais) désigne l'ensemble des moyens mis en œuvre pour capitaliser et partager le savoir-faire des opérateurs à des fins de prévention. La politique du retour d'expérience cherche à recenser les accidents et les incidents, à les analyser, à les rendre visibles aux opérateurs concernés pour éviter la reproduction de ces événements. En aéronautique, la R.A.F. (Royal Air Force) est précurseur dans ce domaine : confrontée lors de la Seconde Guerre mondiale à d'énormes pertes humaines et à la difficulté de former un personnel navigant qualifié en un temps très court⁷, un système de retour d'expérience est institutionnalisé. Les erreurs récurrentes sont dégagées à partir des compte rendus de mission et des rapports de chef d'escadrille. Un bulletin mensuel (respectant la confidentialité) est distribué aux pilotes pour analyser ces erreurs de pilotage, rappeler les procédures de vol... Une bande dessinée est par ailleurs publiée, et sur un ton humoristique, les erreurs fréquemment commises sont rappelées. Enfin, l'incident aérien ou l'erreur grave du mois est commenté et vaut à son auteur la distinction sarcastique de " l'ordre de l'OIF " (Order of the Irremovable Finger...) [Clostermann, 1990 ; Dupérier, 1992].

À travers l'étude des rapports d'événements aériens et l'exploitation systématique des paramètres de vol, le retour d'expérience est un élément clef de la sécurité aérienne pour dégager des recommandations relatives aux

⁷Par exemple, au plus fort de la Bataille d'Angleterre, les pilotes remplaçants sont envoyés au combat alors qu'ils n'ont qu'une faible expérience de leur appareil, une dizaine d'heures de vol tout au plus.

procédures, à la formation et aux équipements pour améliorer la sécurité aérienne.

Rapports d'accidents

Dans le cadre de la sécurité aérienne un ensemble de dispositions est adopté sous l'égide de l'OACI [BEA, 2003a ; SFACT, 2002 ; DGAC, 2003] pour organiser et codifier les enquêtes sur les accidents⁸. La convention internationale stipule que " l'enquête sur un accident ou un incident a pour seul objectif la prévention de futurs accidents ou incidents " et que " cette activité ne vise nullement à la détermination des fautes ou des responsabilités ". En Europe, une directive signée par les états membres précise que ces enquêtes sont conduites par un organisme spécialisé indépendant des autorités aéronautiques (navigation aérienne...) et des parties intéressées (compagnie aérienne...) En France, le B.E.A. (Bureau Enquête Accident) est la structure officielle chargée des enquêtes techniques sur les accidents et les incidents pour l'aviation civile. Lorsqu'un accident se produit, des enquêteurs, accompagnés parfois de spécialistes en différents domaines (structures, moteurs...) sont dépêchés sur le site pour analyser l'épave et récupérer les boîtes noires. Par ailleurs, un certain nombre de données sont collectées pour éclaircir les causes de la catastrophe aérienne :

- l'information sur le trafic ;
- l'entretien de l'appareil ;
- les éléments météorologiques.

L'ensemble de ces éléments est exploité et confronté pour construire des scénarios possibles de la catastrophe qui sont testés ensuite en simulateur de vol. Les conclusions une fois établies doivent déboucher entre autres sur des recommandations (modification d'une pièce de l'avion, changement d'une procédure aérienne...) pour éviter la reproduction de ce type d'accident.

Rapports d'incidents

Les A.S.R. (Air Safety Report) et les rapports confidentiels [Barth, 2003] sont deux sources de données rédigées par les pilotes pour rendre compte d'un événement lié à la sécurité. Dans le premier cas, c'est un formulaire rempli par le personnel navigant pour rapporter un dysfonctionnement d'un

⁸Accident aérien : événement lié à l'utilisation d'un aéronef, qui se produit entre le moment où une personne monte à bord avec l'intention d'effectuer un vol et le moment où toutes les personnes qui sont montées dans cette intention sont descendues et au cours duquel :

- une personne au moins est mortellement ou grièvement blessée ;
- l'aéronef a disparu, ou subit des dommages tels que sa performance de vol est altérée

D'après l'annexe 13 à la convention relative à l'OACI

système (fausse alarme, panne...) rencontré lors du vol. Dans le deuxième cas, il s'agit d'un canal de retour d'expérience anonyme où un équipage relate un événement comportant un aspect facteur humain (erreur de pilotage, perte de la conscience de situation [Endsley, 1995]). Les pilotes qui acceptent de rédiger ces rapports bénéficient de la confidentialité et d'une certaine immunité⁹, c'est-à-dire qu'ils ne peuvent faire l'objet d'une procédure disciplinaire ou judiciaire pour faute professionnelle.

Analyse systématique des vols

L'analyse systématique des paramètres de vol représente un des moyens pour le retour d'expérience. Ce processus est utilisé pour détecter les écarts par rapport aux standards de sécurité (ex : sortie d'enveloppe de vol, déviation de trajectoire, dépassement de vitesse...) Si les accidents aériens, relativement rares, sont la manifestation visible d'un enchaînement malheureux de défaillances des agents et des systèmes impliqués dans la sécurité aérienne (pilotes, contrôle aérien ...), en revanche, il se produit quotidiennement dans les vols commerciaux et militaires des événements incidentiels mais dont la gravité ne remet pas en cause la sécurité. Ainsi, plus que l'approche rétroactive de l'analyse d'accidents qui consiste à proposer des mesures correctives pour éviter leur reproduction et qui trouve ses limites du fait de la rareté des accidents, le dépouillement systématique des paramètres de vol permet d'identifier de nouveaux événements incidentiels, précurseurs de dégradation de l'activité de pilotage et de catastrophe aérienne. Dans ce sens, on parle alors de démarche proactive.

La majeure partie des grandes compagnies aériennes utilisent l'analyse systématique des paramètres de vol, qui est par ailleurs obligatoire en France depuis 1992. La compagnie Air France [Barth, 2003] dispose depuis 1974 d'un service prévention et sécurité des vols composé aujourd'hui d'une trentaine de personnes et dont la tâche est de collecter et de traiter par des moyens informatiques et humains les 900 étapes quotidiennes de sa flotte. Ces données sont soumises à des tests et lorsque ceux-ci se révèlent positifs (détection d'une anomalie), le système informatisé génère un événement auquel est attribué un indice de gravité (suivant une échelle de 1 à 3). Les événements classés 2 et 3 sont envoyés à des analystes qui vérifient leur cohérence, réalisent des statistiques et soumettent les plus significatifs aux experts qui sont des pilotes navigants. Ces pilotes formulent une évaluation de ces événements et décident ou non de les présenter à la commission d'analyse des vols qui émettra des recommandations pour améliorer les défenses de la compagnie face à ces risques. Le deuxième rôle de cette analyse systématique est de réaliser une évaluation

⁹Cette immunité dépend toutefois de la gravité de la faute commise par l'équipage.

opérationnelle de nouveaux équipements tel que l'EGPWS (Enhanced Ground Proximity Warning System, système de détection de proximité sol). L'intérêt est de déterminer le gain sécuritaire obtenu par l'introduction de ces systèmes.

1.3 Vers une approche anthropocentrée de la sécurité aérienne

Le rôle de l'opérateur dans la sécurité se comprend dans l'esprit d'une dialogique (au sens de Morin [Morin, 1994]) c'est-à-dire qu'il est à la fois l'agent de fiabilité et l'agent faillible. Il tient un rôle positif dans le sens où c'est lui qui supervise un processus et le régule par ses actions [Leplat, 1985], mais aussi et surtout face à un comportement imprévu ou erratique du processus, il est le seul capable de faire face pour récupérer la situation. Il tient un rôle négatif lorsqu'il s'écarte de l'application normale des procédures en commettant des erreurs [Keyser, 1982] : il remet en cause la sûreté du système dont il a la responsabilité et dans certaines circonstances il remet en cause l'intégrité de son environnement.

Dans cette section, nous discutons des différentes solutions envisagées et des théories émergentes en ergonomie pour tenter de résoudre la problématique de la sécurité et de la place du pilote dans le système aéronautique actuel.

1.3.1 L'approche ingénierique : l'automatisation

Partant du constat que les déficiences de l'opérateur sont à l'origine de 70 % des accidents ou incidents, le parti pris, à partir des années 70, a été d'introduire des systèmes automatisés pour l'assister [Grau et Hourlier, 2000 ; Amalberti, 2002]. Cette automatisation est définie par Amalberti comme " *tout aide qui effectue en série ou en parallèle de l'opérateur des opérations de tri, de décision, et d'action habituellement dévolues à cet opérateur* " [Amalberti, 2002]. L'idée, en principe, est de remplacer l'opérateur pour des tâches dont la réalisation exige une habileté exceptionnelle de l'opérateur ou un travail fastidieux et répétitif (surveillance d'un paramètre peu évolutif, attente passive d'un événement rare...) [Wanner, 1992 ; Wanner et Wanner, 1999]. Pourtant, depuis les premiers automates, les progrès scientifiques, notamment en informatique, ont permis de concevoir des systèmes d'aides plus complexes ou " *automatismes intelligents de haut niveau* " [Amalberti, 2002], qui disposent de fonctions de conduite, de diagnostic ou de décision.

Pour garder " l'homme dans la boucle de pilotage ", le couplage de ces systèmes est réalisé avec l'équipage depuis les années 80 par une interface dite

“ glass cockpit ”, c’est-à-dire constituée d’écrans numériques qui indiquent les informations sur la conduite de l’appareil (modes de pilotage, paramètres de vol, pannes...) L’utilisation de ces écrans numériques permet une présentation de l’information synthétique et dynamique (évolution avec le contexte) mais aussi plus interactive (affichage par pages).

Pourtant, en dépit de l’introduction de ces systèmes, le gain en sécurité est mitigé : la sécurité, bien qu’exceptionnelle, ne s’est plus améliorée dans l’aéronautique civile depuis les trente dernières années et semble même légèrement se dégrader [Amalberti, 2001] si l’on considère l’augmentation toujours croissante du trafic aérien. À cela, plusieurs explications :

- ces systèmes ont fait évoluer le rôle des pilotes vers une activité de supervision et une surveillance passive. Ils ont donc logiquement déplacé la source des erreurs et s’ils permettent d’éviter les erreurs bénignes (type erreur de routine [Reason, 1990]), ils créent en revanche de nouveaux types d’erreurs dont les conséquences sont beaucoup plus graves [Sweet, 1995] :
- les erreurs dans l’insertion des paramètres sont liées à la multiplication des automates à programmer. Ces erreurs de paramétrages sont rarement détectées par le fait que les pilotes ont tendance à ne vérifier que le résultat final et non les étapes intermédiaires [Amalberti, 1996]. Ce type d’erreur a de surcroît la dangereuse caractéristique de rester latente avant de se manifester,
- les erreurs de représentation sont le résultat d’une méconnaissance des équipages des calculateurs embarqués [Sarter et Woods, 1994 ; Sarter *et al.*, 2003] : les pilotes ont des difficultés à diagnostiquer les pannes de ces systèmes et des procédures à utiliser ou de l’attitude à adopter (débrayer ou non l’automatisme) pour recouvrer un état normal, ensuite les changements inopinés de mode de pilotage automatique ne sont pas toujours détectés ou compris par les pilotes et peuvent avoir des conséquences catastrophiques,
- les erreurs liées à la détérioration de la coordination de l’équipage (où erreur de Cockpit Resource Management) sont dues en partie aux modifications des interactions hommes-machines entraînées par l’automatisation : les manipulations sont moindres ce qui rend plus difficile pour les pilotes de se surveiller et d’inférer les intentions de chacun [Amalberti, 1996] ;
- ces systèmes ne sont pas parfaitement adaptés aux pilotes, car leurs concepteurs, issus d’une tradition d’ingénierie, ont une vision très logique et procédurale du raisonnement humain et ne développent pas systématiquement ces automates, ou ces interfaces, en pensant aux utilisateurs et laissent par conséquent l’opérateur hors de la boucle [Amalberti, 1996] ;

- les automatismes sont conçus pour gérer des situations normales. On compte alors sur les équipages pour récupérer en urgence des situations anormales, en urgence, et qui sont par définition plus complexes [Amalberti, 2002].

1.3.2 L'approche de l'ergonomie

Face à la problématique de l'erreur humaine et de la place de l'opérateur dans la conduite de systèmes dits à risque (aéronautique, industrie chimique...), l'ergonomie a deux attitudes :

- la première est d'adopter une politique critique en “ *centrant ses efforts sur la prise de conscience par les concepteurs et les opérateurs des paradoxes et des faiblesses de l'automatisation et des systèmes d'aide proposés* ” [Grau et Hourlier, 2000] ;
- la seconde est de développer des modèles de comportement de l'opérateur dans son environnement de travail afin de concevoir des systèmes d'aide en adéquation avec l'utilisateur, c'est-à-dire écologiques, autrement dit qui respectent le fonctionnement humain et visent à y être adapté [Amalberti, 2002 ; Wioland, 1997].

Modèles cognitifs de l'opérateur humain : principes

L'ergonomie, et en particulier l'ergonomie cognitive, s'attache à proposer des modèles cadres ou globaux¹⁰ du fonctionnement cognitif de l'opérateur humain en situation de travail.

Examinons-en les principes psychologiques fondamentaux :

- Principe 1 : l'activité réelle d'un opérateur n'est jamais totalement conforme à la tâche prescrite (*i.e.* telle que définie par les normes, ce qui lui est demandé de faire par les procédures) : les contraintes de son environnement (procédures inadaptées ou trop longues, interface mal conçue, événements imprévus, fatigue...) vont obliger les opérateurs à s'adapter pour réaliser leurs objectifs [Leplat, 1997 ; Leplat et Hoc, 1983].
- Principe 2 : les capacités humaines de traitement de données sont limitées (théorie de la communication de Shannon et Weaver [Shannon, 1975]) : la cognition humaine ne peut traiter toutes les informations qui l'entoure. L'acte de prise d'information est par conséquent sélectif et repose sur des critères de pertinence que De Keyser [Keyser, 1990] appelle des *filtres* qui sont soit statistiques (fréquence d'un signal), soit sémantiques (haute signification d'un signal, ex : alarme).

¹⁰c'est-à-dire qu'ils décrivent l'activité cognitive dans son ensemble et ne s'intéressent pas à un phénomène en particulier (mémoire, attention...)

- Principe 3 : la prise d’information a pour objet de constituer une représentation de la situation. Pour Ochanine [Ochanine, 1978], laco- nisme, adéquation à la tâche et déformation fonctionnelle sont les trois propriétés qui caractérisent la représentation¹¹. ;
- Principe 4 : la représentation constitue un espace problème de la situation ou de la tâche à résoudre à partir de laquelle un opérateur humain peut raisonner. Rassmussen [Rassmussen, 1986] avance que les opérateurs (en relation avec les théories de Shrifin et Schneider [Shiffrin et Schneider, 1977]) disposent de trois niveaux de raisonnement qui peuvent être uti- lisés en parallèle en fonction de la complexité de la tâche à effectuer :
 - le niveau *Skill-Based-Behavior*, fondé sur les automatismes sensori- moteurs et les habitudes, est utilisé pour réaliser des tâches routinières et maîtrisées ;
 - le niveau *Rule-Based-Behavior*, fondé sur les règles de type *si...alors*, est utilisé pour résoudre une situation inhabituelle, mais déjà rencontrée ;
 - le niveau *Knowledge-Based-Behavior*, fondé sur des raisonnements ana- logiques plus complexes, est utilisé pour faire face à une situation in- connue.
- Principe 5 : la nature de ce raisonnement est avant tout anticipative et ce pour ne pas être surpris par un événement et devenir réactif, mode de fonctionnement pour lequel l’homme n’est pas le plus adapté [Hoc, 1989] ;
- Principe 6 : le fonctionnement des opérateurs est régi par un principe d’économie afin de “ *rester dans une zone de confort pour ne pas être en permanence au maximum de ses capacités, ce qui serait générateur de fatigue et [...] à garder en réserve une capacité d’intervention pour faire face aux événements non planifiés* ” [Grau et Hourlier, 2000]. Une des conséquences de ce principe est que les opérateurs réalisent des compromis où ils ac- ceptent de ne pas comprendre ou seulement en partie des situations qu’ils jugent comme peu pertinentes. D’un point de vue comportemental cela se traduit par le fait qu’un opérateur commet des erreurs mais qu’il en récupère la plupart [Rizzo *et al.*, 1987].
- Principe 7 : il existe un niveau optimal de performance pour un opérateur en fonction de son niveau d’activité et de l’exigence de la tâche à réaliser. En revanche, à faible niveau d’activité (hypovigilance) ou lorsque l’acti-

¹¹Elle est laconique et adéquate à la tâche puisque élaborée à partir d’un îlot restreint d’in- dices pertinents pour le but à atteindre. De nombreux travaux, comme ceux menés par Ocha- nine [Ochanine, 1978], montrent que des opérateurs experts ont une vision déformée de la réalité pour mieux agir (dans son expérience, Ochanine demande à des médecins et à des étudiants en médecine de dessiner de mémoire un fragment de thyroïde malade. Les résultats montrent que les étudiants reproduisaient très fidèlement l’organe alors que les médecins ex- perts avaient, dans leur dessin, exagéré la représentation des parties lésées de la glande).

tivité est trop importante (stress), sa performance se dégrade.

Ces principes (non exhaustifs) apportent des éclairages intéressants pour concevoir des aides et définir le partage des tâches entre l'opérateur et les automatismes :

- une aide trop normative ne peut raisonnablement assister un pilote (d'après le principe 1) ;
- les interfaces doivent présenter des informations synthétiques et pertinentes (d'après les principes 2, 3 et 4) qui permettent à l'opérateur d'avoir un contrôle anticipatif (d'après le principe 5) ;
- il est inutile de produire des aides qui détectent de manière systématique toutes les erreurs de pilotage et préviennent les pilotes (d'après le principe 6) ;
- l'aide doit décharger l'opérateur d'une partie de son activité tout en lui laissant des tâches stimulantes à réaliser (d'après le principe 7).

1.3.3 Application des principes de l'ergonomie dans la sécurité aérienne

L'insuffisance des modèles de fonctionnement de l'opérateur humain dans les milieux technologiques de la conception, la complexification des futurs avions et des environnements auxquels sont confrontés les pilotes (augmentation du trafic, contexte opérationnel militaire...), l'émergence des travaux de l'ergonomie cognitive et les progrès en intelligence artificielle [Grau et Hourlier, 2000] ont débouché sur de nouveaux types de projets de recherche dans les domaines de la conception de procédures, de formation, du retour d'expérience et des équipements de bord pour améliorer la sécurité aérienne.

Procédures et check-lists

Des analyses de la NTSB (National Transport Safety Board) [Degani et Wiener, 1993] insistent sur le rôle joué par des check-lists incohérentes ou incomplètes dans la dégradation de l'activité des pilotes qui ont conduit à des catastrophes aériennes (Northwest Airlines 255, 1988 ; Delta Airlines 1141, 1989 ; US Air 5050, 1990). Un des rapports de la NTSB [NTSB, 1988] critique l'inexistence d'étude en facteurs humains relatives aux check-lists. Depuis, certains travaux en ergonomie cherchent à définir une méthode : ainsi l'approche de Degani et Wiener [Degani et Wiener, 1997] se focalise sur l'étude des check-lists, l'analyse d'accidents, et l'entretien avec des pilotes de compagnie pour développer des modèles de comportement des équipages et comprendre les problèmes d'interruption d'exécution de procédures. Ils s'intéressent en autres

à analyser la cohérence entre les exigences commerciales, la philosophie de la compagnie et les contraintes opérationnelles : un exemple cité est celui d'une compagnie qui demande à ses commandants de bord d'être présents pour saluer le débarquement des passagers de première classe, alors que les textes de cette même compagnie réclament que ces mêmes commandants de bord doivent assister le copilote pour réaliser la procédure terminale " *shut down* ". En conclusion, ils préconisent une méthode de conception des check-lists qui s'appuie sur la cohérence entre Philosophie (stratégie commerciale) et Politique (tactique commerciale) d'une compagnie, et les Procédures et Pratiques réelles des pilotes (" *modèle des 4 P* ").

La formation : le tuteur intelligent

En raison des coûts prohibitifs pour former des pilotes en vol réel ou même simulé, les tuteurs intelligents représentent une solution intéressante et à moindre coût pour apporter des connaissances expertes aux pilotes novices ou pour maintenir l'entraînement des pilotes expérimentés. Ces agents artificiels sont capables de réaliser des cours (ex : vol aux instruments, diagnostic de panne) en s'adaptant au profil et au niveau des élèves. Ces systèmes possèdent des modèles cognitifs d'apprenants novices et experts, et c'est à partir de l'analyse des actions des élèves sur l'environnement de simulation que le tuteur intelligent donne des instructions pour guider l'apprentissage [Chu *et al.*, 1995].

Plus récemment, les techniques des systèmes multi-agents ont été appliquées à la formation en aéronautique [Popov *et al.*, 2002]. Dans ces systèmes, des agents artificiels réalisent des fonctions particulières pour faire réaliser des apprentissages à des pilotes :

- l'agent Interface réalise la communication entre les autres agents artificiels du tuteur intelligent et les composants du système (simulateur, réalité virtuelle, procédures) ;
- l'agent Curriculum trace l'évolution de l'apprenant en interaction avec le système et construit progressivement l'historique des événements ;
- l'équipe d'agents Évaluateurs des erreurs réalise le diagnostic des erreurs de l'apprenant selon trois axes : ergonomie, connaissance ou psychologie ;
- l'agent Pédagogique effectue l'évaluation et apporte une aide à l'apprenant ;
- l'agent Manager de ressources didactiques recherche les ressources pédagogiques requises par l'agent Pédagogique.

Ce système permet de former et d'entraîner des pilotes à utiliser des procédures de vol : des procédures sont présentées et les pilotes doivent réaliser les actions correspondantes sur le simulateur de vol associé. Par

ailleurs les élèves sont aidés par un agent virtuel appelé Baldi qui les guide dans leur apprentissage.

Pourtant certains auteurs critiquent ces auto-formations : d'une part la formation des pilotes est incompressible et aucune auto-formation ne peut se substituer des étapes de l'apprentissage classique, d'autre part ces auto-formations amènent les élèves à développer des réflexes individuels et dissociés de l'activité globale de pilotage.

Le retour d'expérience

L'étude REX-FH [Chaudron *et al.*, 2000c], menée en coopération entre l'ONERA (Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales) et l'IMASSA (Institut de Médecine Aéronautique du Service de Santé des Armées), vise à mettre au point une méthode de retour d'expérience sur les facteurs humains pour la sécurité des vols des avions militaires. La méthodologie proposée diffère des analyses systématiques des vols mises en place par les compagnies aériennes car ces dernières ne tiennent pas compte de la variabilité intra et interindividuelle et ne s'intéressent qu'à des conduites très procéduralisées. L'approche suivie par REX est centrée sur la modélisation de l'activité des pilotes. Des modèles descriptifs d'activité (MDA) sont établis à partir de l'analyse des procédures de vol et des entretiens avec les pilotes. Ces MDA sont partiels, c'est-à-dire qu'ils ne cherchent à représenter seulement ce qui est nécessaire pour répondre aux problèmes opérationnels posés. Ils sont ensuite formalisés et sont utilisés pour identifier *a posteriori* les écarts possibles réalisés par les pilotes d'après la typologie d'Hollnagel [Hollnagel, 1994] (omission, intrusion, inversion, gestion erronée du temps). Dans cette étude on s'intéresse autant aux écarts négatifs (c'est-à-dire défavorables à la sécurité des vols) qu'aux écarts positifs des pilotes (favorables à la sécurité des vols), de manière à faire connaître les procédures redéfinies par les pilotes et qui améliorent la sécurité aérienne et essayer de trouver des recommandations pour éviter les tendances qui au contraire dégradent la performance des pilotes.

Dans le cadre du projet américain AvSP, un programme de recherche [Maille, 2003] se concentre sur la définition d'une méthodologie permettant d'analyser automatiquement et régulièrement des rapports d'incidents aéronautiques. Celle-ci doit permettre, à terme, de mettre en évidence des groupes d'incidents centrés sur le facteur humain qui soient significatifs pour un expert de la sécurité aérienne, sans connaissances *a priori* de la problématique recherchée. Sur la base des notions fondamentales utilisées par des experts pour évaluer les liens entre divers incidents, un modèle d'incident est construit et la notion de scénario est formalisée à partir de trois composantes :

- le contexte correspond à la situation initiale qui va permettre à l'incident de se développer ;
- le comportement décrit tous les événements problématiques qui conduisent à avoir un incident ;
- l'anomalie caractérise les états anormaux atteints.

L'originalité de cette méthode est qu'elle cherche à dégager des précurseurs d'accidents, non plus à partir de paramètres de vol numérique, mais à partir d'information symbolique contenue dans des fiches d'incidents rédigées par les pilotes, beaucoup plus riches en explications sur les circonstances de ces accidents.

Équipements de bord : l'assistance au pilotage

Depuis les années 90, de nombreux projets de recherche visent à concevoir une assistance au pilotage dite " intelligente " (Pilot's associate, USA ; Crew Assistant Military Aircraft, Allemagne ...) [Grau et Hourlier, 2000]. Le point commun de ces études est de développer un système capable de participer à des tâches sur la demande de l'équipage, de surveiller des paramètres, d'anticiper des situations et de communiquer avec le pilote [Rubin *et al.*, 1988 ; Jones et Mitchell, 1994]. La définition de ces assistants au pilotage de nouvelle génération concerne deux aspects essentiels :

- la transparence pour l'opérateur du fonctionnement de l'aide. Billings [Billings, 1991] et Billings et Woods [Billings et Woods, 1994] préconisent l'importance de créer une communication entre l'aide et les opérateurs humains. L'idée de cette transparence est que l'homme puisse avoir confiance dans un système qui engage sa sécurité. Amalberti [Amalberti, 1996] distingue quatre niveaux de compréhension pour comprendre et juger pertinente une aide : (1) rendre la proposition compréhensible, (2) être capable de l'évaluer, (3) comprendre son élaboration par le système et (4) être capable de la mettre en œuvre.
- la répartition de la charge de travail entre l'opérateur et cet aide. Cet aspect a été étudié dans le développement d'aide adaptative [Rouse, 1984 ; Rouse, 1985] ("*adaptive aiding* " en anglais) qui repose sur les concepts d'allocation dynamique de tâches et de tolérance à l'erreur. Le premier concept cherche à améliorer les interactions hommes-machines en partageant dynamiquement, selon le contexte, les tâches à allouer aux opérateurs humains et aux systèmes automatisés pour garder l' " homme dans la boucle ". Le deuxième concept consiste à détecter les erreurs des opérateurs et fournir des moyens pour les corriger ou minimiser leurs effets.

Pour assister le pilote, le système dispose d'une base de connaissances qui lui permet d'inférer les intentions du pilote en analysant ses actions durant

le vol [Callantine, 2002]. Cette reconnaissance d'intention permet à l'agent de déduire les tâches à réaliser pour réduire la charge de travail du pilote, de détecter les incohérences éventuelles dans le pilotage, et de communiquer avec l'équipage. Ces bases de connaissances sont établies soit à partir de la modélisation des procédures de vol, soit à partir de la modélisation de l'activité cognitive des pilotes.

Suivi d'activité à partir des procédures de vol et prédiction d'erreurs Une des premiers de ces systèmes d'aide date des années 80 et est destiné à détecter et corriger les erreurs procédurales (c'est-à-dire des erreurs dans l'exécution d'une procédure aérienne) [Rouse *et al.*, 1982]. Ce système est fondé sur l'utilisation de scripts hiérarchisés de procédures de vol pour identifier les actions correctes, omises, ou rajoutées par les équipages. Il a été testé avec des paramètres récupérés lors de vols réels sur bimoteur et a montré son efficacité pour traiter ces erreurs et les corriger *a posteriori*.

Demolombe et Hamon [Demolombe et Hamon, 2002] présentent une approche de reconnaissance des intentions du pilote pour aider ou contrôler ce dernier. Les données disponibles sont les séquences de commandes et les procédures. Le formalisme utilisé comprend des axiomes de changement d'états et un langage logique (calcul de situation) pour décrire ces états. La reconnaissance d'intentions se fait par reconnaissance des séquences d'actions, par exemple la reconnaissance de la séquence fermeressence ; . . . ; accéléreràfond ; . . . ; fermergaz pour reconnaître la procédure feumoteur.

Le projet CATS (Crew Activity Tracking System) de Callantine [Callantine, 2002] a pour objectif le suivi de l'activité de pilotage et l'analyse des performances de l'équipage en ligne. Un modèle d'activité est représenté sous la forme d'un arbre dont la racine est l'activité et ses fils, les actions à réaliser. Lorsqu'une action est reconnue, le système de suivi repère les activités susceptibles d'être entreprises par le pilote et attend de celui-ci l'action suivante de façon à affiner la reconnaissance. La mesure des temps d'attente entre deux activités et l'écart par rapport à des temps de référence permet de donner une allure de la performance du pilote.

Ces projets ont également pour ambition de réaliser des prédictions d'apparition d'erreurs humaines pour prévoir en temps réel la dégradation de l'activité des pilotes [Leiden *et al.*, 2001]. Pour les raisons que nous avons exposées dans l'introduction de ce manuscrit, ces systèmes, qui suivent globalement la même approche, ne sont pas réellement efficaces pour annoncer la dégradation de l'activité des équipages. Tout au plus, ils offrent des outils plus performants pour permettre à des analystes de mieux comprendre *a posteriori* la survenue d'incidents.

L'orientation des recherches dans le domaine de la prédiction se tourne vers l'identification de scénarios aériens qui provoquent l'apparition d'erreurs de pilotage [Callantine, 2002 ; Maille, 2003].

Modélisation cognitive de l'activité de pilotage Le " Copilote électronique " est un projet ambitieux d'assistance au pilotage d'avions d'armes qui cherche à intégrer les savoir-faire et concepts de l'ergonomie [Amalberti et Deblon, 1992 ; Grau et Hourlier, 2000]. L'originalité de ce programme est qu'il intègre véritablement le facteur humain dans les étapes initiales de conception. Au delà des enjeux des projets précédents qui analysent l'activité du pilote à partir des seules procédures de vol, l'expertise de ce système d'assistance repose sur une véritable modélisation cognitive du pilotage d'avions d'armes établie à partir d'entretiens avec des pilotes des Forces. Cette approche permet d'obtenir une représentation plus riche de l'activité des pilotes en intégrant des données comportementales qui ne sont pas décrites dans les procédures de vol. Les objectifs visés sont de :

- donner au pilote un niveau de compréhension qui lui permet de comprendre mais aussi de critiquer les propositions émises par l'aide ;
- prendre en compte les variabilités interindividuelles ;
- définir une expertise cohérente de manière à ce que le pilote puisse avoir confiance en l'aide mais aussi prédire voir anticiper son comportement.

Ainsi le " Copilote électronique " intègre l'ensemble des éléments d'une mission : le pilote, l'aéronef, l'environnement tactique et le cadre de la mission. Les informations disponibles dans l'aéronef (base de données, capteurs, actions du pilote...) permettent de disposer des paramètres d'où sont inférées les informations symboliques propres à chaque composante fonctionnelle. Une étape intégrative gère les différentes contraintes propres à chaque composante en adéquation avec un modèle de reconnaissance des intentions du pilote. Les conseils et analyses élaborés sont alors dépendants de l'analyse du contexte et des compromis cognitifs du pilote. Enfin, la dernière étape est celle de l'élaboration de la communication homme-machine.

Interface pilote-automate Devant les limites théoriques (traitement de l'incertitude, problème de formalisation du concept d'intention...) et pratiques (ressources de calcul des ordinateurs...) pour réaliser un automate doué de capacité de reconnaissance d'intention et de communication interactive, le programme de recherche RPA (Rotorcraft Pilot's associate) [Miller et Harry, 2001] propose d'utiliser une interface pour optimiser la coopération au sein de l'équipage et avec le copilote électronique (" *Crew Coordination and Task Display* "). Cette interface de dialogue (c.f. figure 1.3) se compose de quatre cadrans affichant respectivement les inférences réalisées par le copilote électronique sur :

- la partie de la mission ;
- la tâche de plus haute priorité effectuée par le pilote ;
- la tâche de plus haute priorité effectuée par le copilote électronique ;
- la tâche de plus haute priorité en cours de réalisation par le copilote (humain).

Les pilotes ont la possibilité de valider ou de modifier les inférences réalisées par le copilote électronique suivant s'ils approuvent ou désapprouvent. Ainsi, cette interface permet aux pilotes et à l'automate de partager une conscience commune de la situation où chacun déclare ses intentions et se surveille.

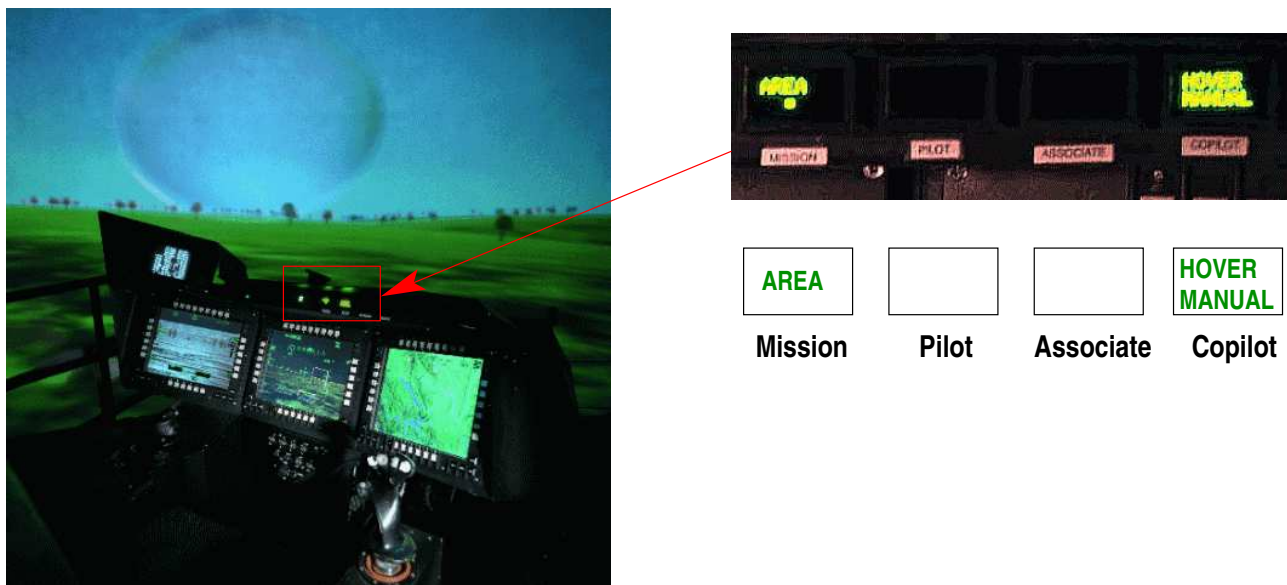


FIG. 1.3: Détail de l'interface " Crew Coordination and Task Display ". Sur cette figure, l'automate annonce la phase de vol (" Area ") et la procédure effectuée par le copilote (" Hover Manual").

Par une approche différente, le projet PAVE (Pilot Assistant in the Vicinity of hElipads) cherche à intégrer différentes technologies pour améliorer la conscience de la situation des pilotes d'hélicoptère [Rataj et Kohrs, 2001]. Ce système est plus une aide au pilote qu'une aide au pilotage : l'idée est de réaliser des automates électroniques qui vont présenter graphiquement de la manière la plus adaptée l'environnement extérieur et la mission (relief, branches de navigation..) en fonction de la phase de vol. Par ailleurs un module de suivi et de surveillance de l'exécution du vol (Flight Execution Monitor) fondé sur le formalisme des réseaux de Petri est développé, ainsi qu'une interface (c.f. figure 1.4) qui permet au pilote de visualiser non seulement les

procédures de vol mais aussi le stade où il se trouve dans ces procédures [Le Blaye *et al.*, 2002].

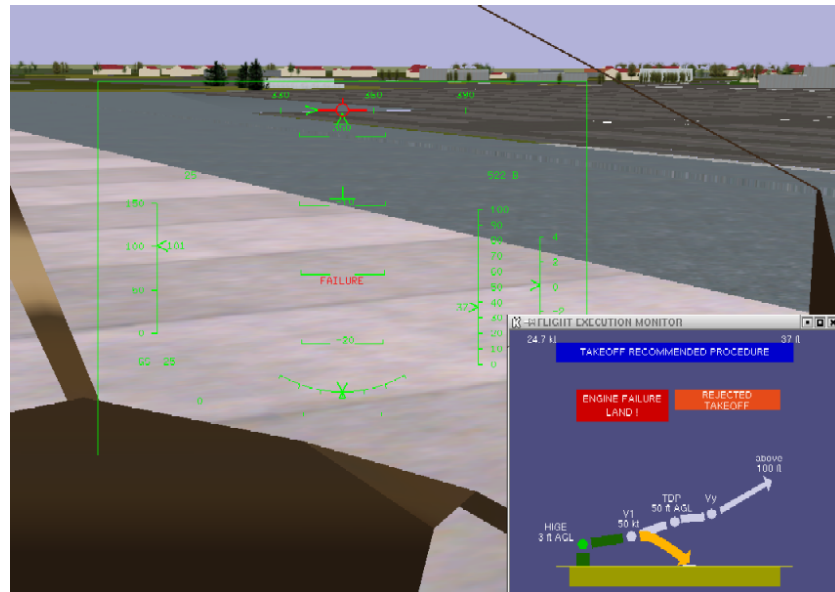


FIG. 1.4: La figure donne un exemple de fonctionnement du module de surveillance d'exécution développé dans le cadre du projet PAVE. Le pilote est en phase de décollage, dont la procédure nominale est figurée sur l'interface superposée (en vert). À la suite à une panne moteur, signalée en vision tête haute (" Failure ", en rouge), l'interface indique la procédure recommandée, se poser en l'occurrence (flèche jaune).

1.3.4 L'apport des neurosciences

Les travaux récents en neurosciences intégratives ont fait progresser le champ des connaissances sur les fonctions cérébrales (mémoire, attention...) en développant diverses approches et techniques expérimentales (IRM, électro-encéphalogramme, études de cas de patients cérébro-lésés, tests neuropsychologiques...) [Cohen, 1993]. Les modèles du cerveau humain de cette discipline suscitent un intérêt en ergonomie depuis la fin des années 90 pour la conception de systèmes adaptés à l'homme. Nadine Sarter [Sarter et Sarter, 2003] a récemment publié un article dont le nom " neuro-ergonomics " est révélateur de cette tendance. En effet la finesse de ces modèles permet de mieux comprendre et prédire les comportements humains. Ainsi Previc [Previc, 2000] s'intéresse à la perte de conscience de situation à partir d'études neuropsy-

chologiques de l'orientation spatiale. Il apparaît que quatre systèmes sont impliqués et régulent nos interactions dans un environnement 3D :

- pour localiser et saisir des objets dans l'entourage (système cortical dorsolatéral) ;
- pour focaliser l'attention et reconnaître les objets (système cortical ventrolatéral) ;
- pour se déplacer dans l'espace (système cortical ventromédial) ;
- pour s'orienter dans l'espace (système cortical dorsomédial) .

La désorientation spatiale trouve son fondement dans les contraintes du pilotage (accélération), dans l'absence de certaines informations sensorielles dans le cockpit, mais aussi dans la localisation non naturelle des informations visuelles et auditives de l'interface qui ne favorise pas leur traitement par les systèmes corticaux évoqués ci-dessus. En conclusion, Previc propose de redéfinir les interfaces de pilotage de manière à ce que la prise d'information et les manipulations dans un environnement en 3D soit en cohérence avec son traitement par le système cognitif correspondant (orientation des écrans par rapport au champ visuel, localisation des alarmes, utilisation plus importante des pieds pour contrôler le vol...)

1.4 Conclusion

La première conclusion que nous pouvons établir est que l'activité aérienne mobilise des efforts importants pour assurer un fort niveau de sécurité. Elle implique l'engagement de nombreux acteurs du secteur aéronautique (compagnie, pilotes, contrôleur, constructeurs...) mais aussi des organisations étatiques et des centres de recherche. Cette volonté de contrôle et de réduction du nombre d'accidents repose sur la maîtrise stricte et permanente de trois composantes en interaction :

- la réglementation ;
- la formation ;
- les équipements de bord.

La deuxième conclusion est que les approches de l'ingénierie et des sciences humaines, en se concentrant respectivement sur l'amélioration de la performance et de la sécurité, sont complémentaires :

- l'approche des milieux technologiques a été de développer des automatismes pour soulager les équipages dans leur activité et leur permettre de pouvoir piloter des appareils toujours plus complexes et performants. Ainsi de nombreux systèmes automatisés ont été progressivement mis en place pour remplacer l'homme là où ses capacités sont limitées. Par ailleurs, ce milieu, très inventif, propose de nombreuses solutions pour améliorer la conscience de la situation des équipages quelles que soient les conditions de vol (ex : interface de représentation virtuelle du relief) ;

- l’approche des sciences humaines et en particulier de l’ergonomie, qui s’intéresse au fonctionnement de l’opérateur humain, a dans un premier temps adopté une position critique sur les limites d’utilisation opérationnelle de ces systèmes. Ensuite, l’ergonomie s’est attachée à définir des modèles de l’opérateur humain en situation de travail, à développer des concepts originaux et à proposer des recommandations pour la conception d’interfaces.

On comprend donc que le couplage de ces deux approches est une des clefs pour faire progresser la performance et la sécurité de l’activité aérienne.

Enfin, la troisième conclusion est que, si les mécanismes de la production d’erreurs humaines sont relativement bien compris et permettent d’analyser finement *a posteriori* les accidents et incidents aériens, en revanche, la prédiction en temps réel de la dégradation de l’activité des pilotes pour fournir une véritable assistance pose de nombreux problèmes théoriques et pratiques. La solution retenue reste, encore aujourd’hui, celle de la conception d’interfaces adaptées aux pilotes et présentant de manière optimale les informations pertinentes pour éviter l’apparition d’erreurs.

Cette troisième remarque définit le cadre de nos recherches : l’identification et la définition de concepts capables de contribuer à la prédiction de la dégradation de la performance des pilotes et à la fourniture d’aides cognitives. C’est l’objet du chapitre suivant que d’étudier un des concepts centraux de cette thèse : le conflit.

Chapitre 2

Conflit

2.1 Introduction

La notion de conflit jouit d'un intérêt considérable dans de nombreuses disciplines puisqu'on le retrouve en psychologie classique (conflit œdipien), en sociologie et en sciences politiques (conflits sociaux), en géostratégie (conflit ethnique), en intelligence artificielle (conflit de ressource)... Cependant, lorsqu'on s'intéresse à la littérature sur ce concept transversal, on constate qu'il n'a pas de véritable identité formelle et que la confusion est souvent présente. Par exemple au sens commun, le conflit est défini par :

- la "*rencontre d'éléments, de sentiments contraires ou qui s'opposent*" (Petit Robert);
- le "*choc de gens qui en viennent aux mains*" (Littré);
- les "*actions, idées, intérêts ou personnes opposés ou en compétition*" (Encyclopédie Britannica).

La dérive sur l'utilisation de ce concept est la conséquence première de l'ambiguïté entre le conflit *per se* et sa résolution : la guerre n'est pas le conflit, mais une technique de résolution du conflit au même titre que la négociation, le compromis... Ensuite les enjeux particuliers de chaque discipline font que chacun apporte sa vision du conflit en fonction de ses objectifs, comme en intelligence artificielle ou en ergonomie de conception où le conflit est la plupart du temps assimilé au dysfonctionnement. Synonyme d'échec, on s'intéresse plus à le résoudre ou à l'éviter qu'à le comprendre ou en tirer profit. Enfin les passions que suscite ce concept ne font qu'en entretenir l'ambiguïté : ainsi en sociologie, le problème posé par K. Marx au XIX^e siècle, a subi aux États-Unis, selon la formule de Mills une "*Élimination Magique*" [Le Marc, 1999] jusqu'aux années cinquante. En effet les théories animant la scène des sciences sociales insistaient alors sur l'ordre, l'harmonie, les valeurs traditionnelles et

l'intégration ¹.

Dans ce chapitre nous souhaitons évoquer successivement la perception et l'utilisation du conflit à travers les champs de la psychologie sociale, de l'intelligence artificielle et de l'ergonomie; disciplines au centre de notre problématique.

Nous avons également comme motivation de montrer les différents aspects du conflit : ceux qui relèvent de sa structure formelle et ceux, vus en terme psychologiques, qui en définissent les contours affectifs. Cette étude se base sur les travaux de Castelfranchi et sur des théories empiriques en psychologie sociale.

Enfin, cet état de l'art se termine en examinant les différentes techniques proposées pour résoudre le conflit.

2.2 Préambule sur le conflit

2.2.1 Psychologie sociale

L'étude du conflit en psychologie sociale est une question difficile pour deux raisons [Le Marc, 1999].

La première raison tient à l'utilisation commune et confuse du terme de conflit, et non pas de conflit social pour désigner tout mouvement d'opposition, de désaccord, de discussion entre individus et ce dans une perspective centrée sur la recherche de solution, sans tenir compte de l'expression sociale de ces dissensions.

La deuxième raison a pour origine l'enchevêtrement disciplinaire des théories relatives au conflit social : définitions issues de la psychologie proposée par des psychosociologues, références psychanalytiques de sociologues, modèles économiques...

La conséquence est qu'il n'existe pas de théorie unitaire et encore moins une définition générique qui peut faire l'objet d'une formalisation :

- *"il y a conflit lorsqu'une décision ne peut être prise par les procédures habituelles"*, selon la définition de March et Simon qui reste la plus simple et la plus communément admise [March et Simon, 1958];
- Thomas [Thomas, 1976] considère deux types de conflits : le conflit intra individuel qui correspond à la tendance d'un individu à fournir des réponses incompatibles entre elles, et le conflit "dyadique", entre deux

¹La fin de cet éliminativisme de principe peut être attribuée selon certains [Le Marc, 1999] aux mouvements sociaux du "Black Power", du "Flower Power" qui ont agité l'Amérique dans les années 60.

entités (deux groupes, deux personnes...), qui selon l'auteur doit être vu comme un processus qui englobe la perception, les émotions, l'humeur des deux parties. Le conflit se déclenche lorsqu'une des deux entités perçoit un état de frustration chez l'autre ou si elle se sent elle-même en état de frustration vis-à-vis de l'autre entité. Thomas propose une modélisation des conflits qui d'une part s'intéresse à la dynamique des événements qui créent le conflit (Process Model), et d'autre part à un modèle statique qui concerne les conditions de déclenchement d'un conflit (Structural Model) ;

- Coombs et Avrunin [Coombs et Avrunin, 1988] élaborent un formalisme pour les conflits, et insistent sur le fait qu'un conflit intra ou inter-individuel se caractérise par une opposition entre deux réponses comportementales. Ce point de vue sur l'antagonisme entre deux réponses est assez radical, car il peut y avoir conflit entre deux réponses qui sont juste différentes mais pas nécessairement opposées ;
- Putnam et Pool [Putnam et Poole, 1987] donnent une définition large qui embrasse les caractéristiques générales des conflits : *" un conflit correspond à l'interaction de personnes interdépendantes qui perçoivent des oppositions de buts ... et qui voient l'autre partie comme interférant dans la réalisation de leurs buts "* ;
- Simmel [Simmel, 2003] considère que le conflit repose en partie sur l'existence de contradictions sociales qui partage l'individu entre devoirs, obligations et besoins personnels ².

2.2.2 IA, IAD/SMA

La littérature d'IA (Intelligence Artificielle) s'est peu occupée de la notion de conflit dans toute sa généralité. C'est en IAD-SMA (Intelligence Artificielle Distribuée - Systèmes multi-agents) que cette notion, attachée à celle d'agent, est la plus traitée.

Le conflit est la plupart du temps assimilé au dysfonctionnement, au problème et à la contradiction. Il est presque toujours considéré comme une entrave sur le chemin de la solution émergente. C'est une des conséquences de l'orientation applicative (tournée vers l'efficacité) d'une majorité de projets du domaine. Par exemple, dans les systèmes coopératifs, le conflit est vu comme une des situations non-coopératives [Camps, 1998]. Cette définition par ombrage se retrouve dans nombre des approches du conflit.

²Ce point de vue sur le conflit est l'essence des tragédies grecques antiques ; on peut prendre en exemple le dilemme d'Antigone prise entre ses obligations familiales, enterrer la dépouille de son défunt frère, et l'interdiction formulée par le roi son oncle, de ne pas le faire [Hamilton, 1978].

Insistant sur ce point, Müller et Dieng [Müller et Dieng, 2000] récapitulent les principaux travaux sur le sujet. On y trouve les définitions du conflit suivantes :

- toute interférence dans les activités, besoins ou buts d’une des parties, causée par les activités d’une autre [Easterbrook, 1993] ;
- différence de point de vue qui a une importance [Easterbrook, 1993]. Cette approche est raffinée dans [Chaudron *et al.*, 2000a], en trois types de conflits : différence , réfutation, opposition ;
- des définitions moins génériques ou associées à un formalisme précis de résolution :
 - en raisonnement automatique [Reiter, 1987 ; Rochowiak *et al.*, 1994],
 - en planification [Yang, 1992],
 - en IAD-SMA [Durfee *et al.*, 1987 ; Camps, 1998 ; Shaw et Gaines, 1994 ; BERON, 1995],
 - en ingénierie des connaissances [Shaw et Gaines, 1989 ; Dieng, 1995 ; Breuker et de Velde, 1994].

En fait, l’essentiel des travaux portent vers la résolution ou l’évitement du conflit et ce dans le domaine précis et bien délimité de l’application considérée. On trouve alors une définition *ad hoc* du conflit, rarement justifiée. Mais la plupart du temps, il n’est pas du tout défini.

Les conflits sont alors différenciés par le type de résolution associée [Klein et Baskin, 1990] ou une simple classification :

- dans [Deutsch, 1973] sont distingués les conflits réels (connus des parties impliquées) des conflits apparents (observés par une partie extérieure) ;
- dans [BERON, 1995], on a les conflits locaux (petit nombre d’agents impliqués par rapport au cardinal de la société) et les conflits globaux (majorité des agents impliqués) ;
- dans [Sycara, 1998], sont inventoriés les différents types de conflits suivants : conflits de buts, de plans, de connaissances, de croyances (*conflits épistémiques*), de résultats ;
- on peut également trouver des conflits d’intérêts, de ressources, des conflits par rapport aux normes ou aux devoirs, aux obligations (*conflits déontiques*)...

2.2.3 Ergonomie

L’ergonomie, et surtout l’ergonomie de conception, cherche avant tout à optimiser les interactions entre les opérateurs et leurs interfaces. Par conséquent, les travaux s’orientent essentiellement sur la définition de systèmes coopératifs [Hoc, 2001 ; Pavard et Dugdale, 2000 ; Amalberti et Deblon, 1992] en mettant en œuvre des moyens et des outils de dialogue et d’assistance pour éviter l’apparition de conflits [Leroux, 1997].

Le conflit fait toutefois l'objet d'études dans cette discipline, mais il est utilisé sans être vraiment défini ou alors, comme en IAD, de manière *ad hoc*. On distingue alors :

- le conflit entre systèmes d'alerte [Song et Kuchar, 2001]. Ce type de conflit relève d'une contradiction ou " *dissonance* " [Pritchett et Hansman, 1997] entre les informations proposées par chaque système d'alerte. La figure 2.2 en est une illustration remarquable, où deux systèmes, à partir de leur perception de l'environnement, commandent simultanément au pilote de monter mais aussi de descendre pour éviter un autre appareil. Ce type de conflit génère une perte de confiance des équipages envers ces systèmes et est aussi à l'origine de catastrophes aériennes³. Ces auteurs proposent de dresser une typologie de ces dissonances entre systèmes d'alerte et développent des définitions particulières pour les caractériser. Une ébauche de formalisme est également avancée pour tenter de résoudre ces conflits ;

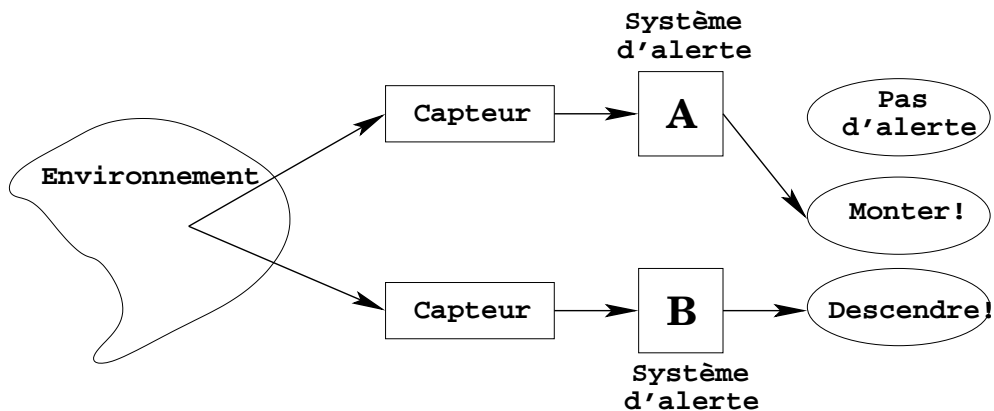


FIG. 2.1: Figure représentant un conflit entre deux systèmes d'alerte

- le conflit dans l'exécution de la tâche de l'opérateur. Ce type de conflit se produit soit parce que les buts définis dans les procédures sont contradictoires, soit parce que la complexité de la situation fait émerger des buts mutuellement incohérents [Woods *et al.*, 1994 ; Dehais et Chaudron, 2000], par exemple :
 - les objectifs sécuritaires et de performance (respecter les horaires, économie de carburant...) ne sont pas conciliables [Loukopoulos *et al.*, 2001 ; Degani et Wiener, 1997 ; Orasanu et Martin, 1998]
 - les agents opèrent de manière non concertée et non coordonnée (ex : conflit d'autorité entre le pilote automatique et le commandant de bord [Sarter et Woods, 1994]) ;

³ex : accident d'un B757 en 1996 en République Dominicaine où un système signale à l'équipage que la vitesse de l'avion est trop lente alors qu'un autre système énonce l'inverse.

- ces buts requièrent l'utilisation d'une même ressource non partageable (ex : un calculateur), ou bien saturent les ressources cognitives des opérateurs [Keyser, 1996] (ex : tâches interférentes qui perturbent la réalisation du but courant [Loukopoulos *et al.*, 2001]);
- le conflit entre avions. Ce type de conflit est sans doute le plus étudié si l'on considère l'imposante documentation scientifique sur le sujet dans le cadre du contrôle aérien [Kuchar et Yang, 2000]. Il est aussi celui qui est le mieux formalisé, du fait que ce type de conflit peut se réduire à des distances entre aéronefs. Par exemple, dans le cadre du trafic en route, l'espacement entre deux aéronefs est de 1000 pieds sur le plan vertical, et de 5 milles nautiques sur le plan horizontal ; si deux avions se trouvent à l'intérieur de cette région dans le même intervalle de temps, leur trajectoire est dite conflictuelle.

2.3 Aspects structurels du conflit

Castelfranchi présente dans son ontologie [Castelfranchi, 2000] les critères formels qui structurent le conflit. Nous proposons ici de nous appuyer sur les travaux de cet auteur en nous concentrant sur les notions d'agents, de but et de contradiction.

2.3.1 Notion de conflit et d'agents

Il est communément admis que le conflit concerne au moins deux agents [Chaudron *et al.*, 2000b], c'est-à-dire deux entités qui peuvent être artificielles (robot, interface du pilote) ou naturelles (espèce vivante). Cependant une telle conjecture semble contradictoire avec l'idée qu'une personne, c'est-à-dire une seule entité, puisse être en conflit avec elle-même [Pawlak, 1984], il est pourtant indéniable que le conflit psychologique est une vérité. L'idée est de transformer le problème en considérant qu'un individu est un ensemble d'entités (soma, psyché) qui interagissent entre elles [Varela, 1996 ; Watzlawick *et al.*, 1967 ; Hesse, 1975].

En résumé, le conflit peut être intra-individuel (interne) [Castelfranchi, 2000] ; dyadique (entre deux individus) [Thomas, 1976] ; entre un individu et un groupe ou entre deux groupes [Chaudron *et al.*, 2000b].

2.3.2 Notion de conflit et de buts

Pour Cr. Castelfranchi [Castelfranchi, 2000], le conflit suppose l'existence d'au moins deux buts ⁴. Ces buts sont définis comme des représentations mentales du monde candidates pour :

- contrôler ou guider l'action ;
- prendre une décision ;
- déterminer les actions à réaliser ;
- qualifier le succès de ces actions ;

Le but [Bell, 1995 ; Castelfranchi, 2000] désigne une classe générale d'états mentaux pour représenter les connaissances d'un agent (obligation, besoin, espoir, intention...), ainsi il peut exister des conflits entre tout ces état mentaux (ex : entre un désir et un devoir, entre une intention et une croyance...)

2.3.3 Typologie des conflits

Castelfranchi propose une classification basée sur une distinction entre des conflits intrinsèques et extrinsèques, directs et indirects et enfin explicites et implicites.

- un conflit est **intrinsèque** lorsque des buts/croyances sont logiquement incohérents, et est **extrinsèque** lorsque le conflit est lié à des problèmes de ressources ;
- Un conflit est **intrinsèque, direct et explicite** si les propositions en conflit sont explicites et directement contradictoires.
(Goal x (p)) ∧ (Goal y (¬ p))⁵ ;
- Un conflit est **intrinsèque, direct et implicite** s'il repose sur des propositions directement en conflit, mais dont l'une au moins est implicite ;
- Un conflit est **intrinsèque, indirect et explicite** si des propositions sont explicites et en conflit "indirectement" par le biais d'une croyance cruciale.
(Goal x (p)) ∧ (Goal x (q)) ∧ (Bel x (p ∨̄ q) <croyance cruciale>⁶ ;

⁴On peut noter que cette conjecture permet également de contourner le problème soulevé par Pawlak : ce sont les buts d'un agent ou d'un groupe d'agents qui sont conflictuels, ainsi, un individu peut être en conflit interne car il a des buts contradictoires (dormir ou aller travailler).

⁵Ici comme dans la suite, il ne s'agit pas de formules formelles, mais d'une notation synthétique analogue à celle utilisée par C. Castelfranchi [Castelfranchi, 2000] : Goal désigne le but d'un agent ; Bel (Belief) désigne la croyance d'un agent ; ∧ représente le ET logique ; ∨̄ représente le OU exclusif ; ¬ exprime la négation.

⁶Par exemple un pilote de chasse en territoire ennemi sait qu'il doit voler à basse altitude car il a la connaissance cruciale que s'il ne respecte pas cette procédure, il est détectable par les stations radar.

- Un conflit est **intrinsèque**, **indirect** et **implicite** si les propositions sont indirectement contradictoires et qu’au moins une de ces propositions ou bien la croyance cruciale est implicite.

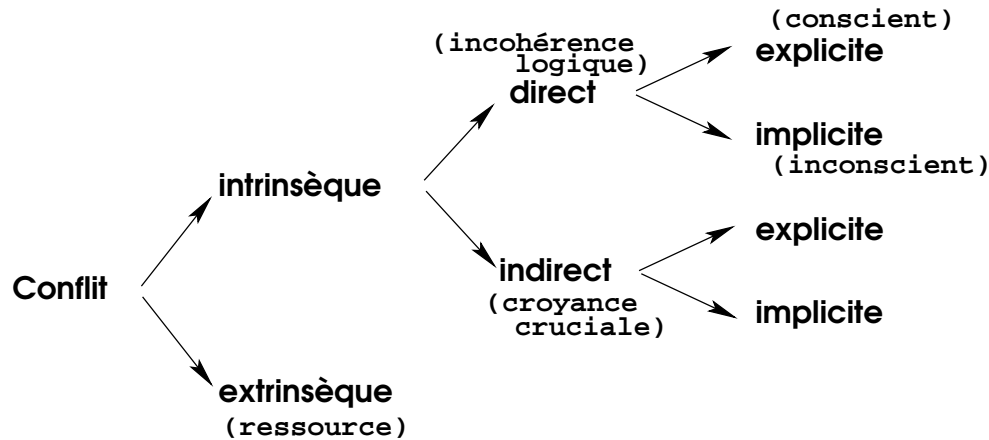


FIG. 2.2: *Typologie des conflits de C. Castelfranchi [Castelfranchi, 2000]*

On peut toutefois établir deux remarques sur cette typologie :

- l’auteur établit une distinction entre des conflits qu’il appelle intrinsèques et extrinsèques, or un conflit extrinsèque peut se réduire à un conflit intrinsèque et indirect. En effet, la ressource limitée joue le même rôle qu’une croyance cruciale : $(\text{Goal } x \text{ (se garer en } z)) \wedge (\text{Goal } y \text{ (se garer en } z)) \wedge (z \text{ est unique et non partageable}) \langle \text{croyance cruciale} \rangle$. Nous préférons donc considérer les conflits de ressources comme un cas particulier de conflit intrinsèque indirect ;
- l’auteur distingue les conflits directs des conflits indirects. Nous considérons pourtant que tout conflit est indirect. Reprenons l’exemple de Castelfranchi d’un conflit direct explicite : $(\text{Bel } x \text{ (} p)) \wedge (\text{Bel } y \neg (p))$, avec p : “Dieu existe”, autrement dit x est croyant, y ne l’est pas. Les deux agents ne sont pas en conflit. Pour qu’il y ait conflit, il faut nécessairement l’existence d’une croyance cruciale qui contraigne ces propositions (contrainte de cohérence, loi naturelle, norme sociale).

2.3.4 Conditions structurelles d’existence du conflit

Castelfranchi distingue plusieurs conditions nécessaires pour le déclenchement d’un conflit :

- les agents ont au moins deux buts contradictoires. Le fait que ces contradictions conduisent au conflit dépend de facteurs psychologiques (personnalité des agents, contexte social) ;

- les agents doivent avoir une connaissance explicite de la contradiction entre leurs buts [Luhmann, 1987 ; Castelfranchi, 2000], un conflit implicite ne représente qu'un conflit potentiel ;
- les agents sont faces à un choix. Le devoir de décider mène au conflit, à condition que la décision finale conduise à une perte pour les agents : par exemple devoir choisir entre prendre une douche ou un bain pour se laver, n'est pas un conflit en soit (les options sont équivalentes), alors que devoir choisir entre prendre le train ou l'avion peut être conflictuel (le train est moins cher, mais on perd du temps ; l'avion est plus rapide, mais on perd de l'argent).

2.4 Aspects psychologiques du conflit

Le conflit ne se réduit pas seulement à son aspect structurel ou formel, il possède également des attributs psychologiques, affectifs [Touzard, 1977] : *“ on peut dire que les aspects structurels contribuent à définir la situation conflictuelle tandis que les aspects affectifs sont, en général, considérés comme des conséquences de la situation de conflit. ”* Pourtant, comme le montrent les travaux suivants, structure et comportements psychologiques influent sur la dynamique du conflit : si l'on définit le conflit par une relation antagoniste par rapport à un même but ou par la poursuite interdépendante de buts contradictoires, alors celui-ci entraîne des attitudes comportementales (agressivité, stéréotypes négatifs, dissonance...) qui à leur tour agissent sur sa structure en le perpétuant et en le modifiant [Touzard, 1977].

2.4.1 Le modèle de Lewin

Kurt Lewin propose une définition structurelle et dynamique des conflits à travers une perspective de champs psychologiques attracteurs et répulsifs [Lewin *et al.*, 1939]. Il dégage trois types fondamentaux de conflits :

- le premier type correspond à la situation où un agent se trouve à mi-chemin entre deux champs de valences positives de force sensiblement égale. Un exemple est celui de l'âne de Buridan qui, affamé, hésite entre deux bottes de foin ;
- le second type se produit lorsqu'un agent se trouve entre deux valences négatives de force égale. Ce type de conflit se raffine en trois cas possibles :
 - l'agent se trouve pris entre des valences négatives mais n'est pas contraint de rester dans le champ de force (ex : un employé doit choisir entre plusieurs travaux dégradants au sein de son entreprise, mais rien ne l'empêche de démissionner),

- l'agent se trouve pris entre des valences négatives mais ne peut s'extraire du champ (ex : un prisonnier doit choisir entre plusieurs punitions),
- l'agent se trouve pris dans une région négative, et doit, pour en sortir passer par une autre région de valence négative (ex : un accusé, pour obtenir la clémence du juge, doit dénoncer ses complices) ;
- le troisième type de conflit s'observe lorsqu'un agent subit des forces opposées qui exercent sur lui des valences négatives et positives. Il en existe deux cas :
 - l'agent est plongé dans une situation ambivalente (ex : accepter un travail intéressant, mais qui en contrepartie réclame une charge de travail très importante),
 - l'agent est entouré par une région négative ou région barrière et est attiré vers un but qui se trouve au delà de cette limite (ex : un jeune homme doit passer par un rite d'initiation cruel pour devenir adulte).

2.4.2 La dissonance cognitive

La notion de conflit a été étudiée par Festinger [Festinger, 1957] dans sa théorie de la dissonance cognitive : un individu se trouve dans un état de dissonance cognitive lorsqu'il est dans des situations non cohérentes, comme par exemple réagir contrairement à son point de vue (*paradigme de la soumission forcée* : tenir des propos racistes au sein d'un groupe, en n'étant pas xénophobe), ou encore être dans une situation contraire à ses attentes (*attente non confirmée* : acheter une maison très chère et se rendre compte qu'elle présente de nombreux défauts).

L'expérience de Festinger pour mettre en évidence la dissonance consiste à faire réaliser à des sujets une tâche qui est à la fois pénible et dénuée de sens : placer des bobines sur des chevilles, les tourner d'un quart de tour, les enlever puis recommencer à plusieurs reprises. Par la suite, l'expérimentateur demande à chaque sujet de l'aider à recruter d'autres personnes pour son expérience : les sujets sont donc mis en contact avec d'autres individus (en fait des complices de l'expérimentateur) et doivent les convaincre que l'expérience à laquelle ils ont participé est très intéressante. Certains sujets sont payés un dollar pour raconter que la tâche est passionnante, d'autres reçoivent une attribution de vingt dollars.

Les résultats de cette expérience semblent *a priori* être pour le moins contre-intuitifs : les sujets les moins bien payés se montrent beaucoup plus convainquants pour motiver les futurs participants, notamment en expliquant que la tâche à réaliser est bénéfique et intéressante, alors que ceux ayant reçus les

vingt dollars argumentent peu en insistant essentiellement sur le gain financier que peut apporter l'accomplissement de la tâche.

L'hypothèse de Festinger pour expliquer ces comportements est que la dissonance produit chez le sujet une tension qui l'incite au changement. Plus la dissonance est forte, plus la situation est psychologiquement inconfortable, et plus la pression pour réduire la dissonance se fait ressentir. Une dissonance peut être réduite : en supprimant ou en réduisant l'importance des connaissances dissonantes, en ajoutant ou en augmentant l'importance des connaissances consonantes.

Ainsi dans l'expérience, les sujets payés vingt dollars ne sont pas en dissonance, la somme perçue fournit une explication cohérente pour justifier leur comportement ; en revanche, les sujets payés un dollar sont dans une situation dissonante, la seule façon pour justifier leur comportement et de changer leur attitude vis-à-vis de la tâche en la considérant sous un aspect positif ("*ce n'est pas si long que ça, c'est pour aider la science, ce n'est pas si inintéressant que cela...*").

Cette hypothèse rejoint la théorie de l'équilibre d'Heider [Heider, 1958] qui considère qu'un individu cherche à être cohérent (*état d'harmonie*) dans l'interaction avec son environnement. Cette cohérence porte sur trois plans [Vignaux, 1991] :

- celui de la cohérence comportementale, c'est-à-dire la correspondance entre la réaction d'autres individus et le comportement que l'on attend d'eux ;
- celui de notre cohérence interne, entre ce que nous sommes et ce que nous faisons ;
- celui des correspondances établies entre nos appartenances, attitudes, croyances et opinions.

2.4.3 Expérience de Sherif [Sherif et Sherif, 1953]

Sherif [Sherif et Sherif, 1953] a mené des expérimentations pour établir le lien entre les aspects structurels et affectifs du conflit. Le principe de ses expériences est le suivant :

- des jeunes enfants qui ne se connaissent pas, mais de même milieu social, sont rassemblés pour participer à un camp de vacances. Aussitôt des amitiés apparaissent, basées sur des affinités communes ;
- deux groupes sont constitués en veillant à séparer les amitiés précédemment formées. Ces groupes sont ensuite isolés les uns des autres ;
- des tournois sont organisés (ex : jeu du fanion).

Les comportements suivant sont observés :

- chaque groupe s'organise en établissant un ordre social ;

- les activités compétitives solidarisent la structure de chaque groupe et font croître l'hostilité intergroupe : injures, bagarres, expéditions punitives (le fanion de l'adversaire est brûlé) ...
- les membres d'un groupe, notamment les leaders, s'ils ne sont pas assez vindicatifs, sont évincés ;
- les anciens amis sont agressifs entre eux.

De manière à réduire le conflit, Sherif propose une première phase d'activités communes : manger dans le même réfectoire, séances de cinéma... En dépit de leur caractère neutre, elles sont l'occasion de poursuivre l'agression intergroupes, certains sujets refusant même de se rendre au cinéma si des individus de l'autre groupe y sont présents. Une deuxième phase consiste à réaliser des tâches qui nécessitent la participation active des deux groupes : réparer le camion qui apporte la nourriture, collecter de l'argent pour voir un film, chercher de l'eau pour approvisionner le camp... Ces activités en revanche permettent d'atténuer progressivement les tensions intergroupes, la solidarité finit par triompher et les anciennes amitiés se reforment.

2.5 Résolution du conflit

Pour Castelfranchi, nous l'avons vu précédemment, le conflit est lié à la notion de perte (c.f. partie 2.3.4), c'est-à-dire qu'il correspond à une situation problématique dénuée de toute solution optimale pour au moins un des agents qui y est confronté. Quelle que soit la discipline (IA, psychologie sociale...), il existe plusieurs techniques transversales, donc communes, pour trouver une issue au conflit en le réduisant, l'éliminant, ou en le détournant. Toutefois si celles-ci permettent sa résolution formelle, le conflit peut simplement se déplacer et réapparaître ultérieurement sous d'autres formes⁷. Par ailleurs, il n'existe pas de techniques universelles de résolution de conflit : tout dépend du type de conflit, de son importance, du contexte social et de facteurs psychologiques propres aux agents. De même il est fréquent que ces techniques s'enchaînent et se mélangent pour trouver une issue. Nous proposons d'évoquer ces techniques selon qu'elles permettent de réduire, d'éliminer ou de détourner le conflit considéré.

2.5.1 Réduction du conflit : le compromis

La réduction du conflit correspond à une attitude particulière des agents qui vont accepter de reconsidérer certaines propriétés des buts conflictuels en

⁷Le traité de Versailles a mis fin à la guerre de 14-18, mais il est reconnu comme étant une des causes qui a mené au conflit mondial suivant [Braudel, 1983].

les modifiant ou en les éliminant.

Compromis dans le conflit intra-agent

Dans le cas de la dissonance cognitive (c.f. partie 2.4.2) un individu résout son conflit en réduisant l'importance des propriétés dissonantes et en augmentant l'importance des propriétés consonantes d'un ou plusieurs de ses buts en conflit. Par exemple, un individu est dans une situation conflictuelle vis-à-vis de son travail car si celui offre des satisfactions (intéressant, bien payé), en revanche il lui faut faire deux heures de trajet pour s'y rendre ce qui empoisonne sa vie familiale. Selon Festinger, si cet individu ne peut se résoudre à quitter son travail alors il peut réduire sa dissonance en se convainquant que les propriétés consonantes de son but (intéressant, bien payé) sont supérieures aux propriétés dissonantes (un travail loin du foyer) et en ce sens il réalise un compromis.

Il convient d'observer que les propriétés d'un but ne sont pas toutes manipulables de la même façon et dépendent de leur résistance au changement [Festinger, 1957]. La résistance au changement d'une propriété est fonction du nombre et de l'importance des éléments avec lesquels elle est consonante, de son ancienneté et de son histoire.

Ensuite, dans le cas particulier de la dissonance, le conflit possède une certaine dynamique, ce qui veut dire que l'équilibre que l'agent a établi entre les propriétés consonantes et dissonantes d'un but est instable : l'évolution de l'environnement de l'agent peut l'amener à réviser son point de vue (ex : l'individu à une panne de voiture, il doit prendre le train ce qui rend le trajet encore plus long, et le travail plus insupportable).

Compromis dans le conflit inter-agents

L'adoption d'un compromis dans le cas d'un conflit entre plusieurs agents présuppose que les buts conflictuels aient une structure complexe [Castelfranchi, 2000 ; Kautz, 1987] c'est-à-dire :

- qu'ils soient atteignables en partie, ce qui veut dire qu'ils aient une dimension quantitative, graduelle (ex : manger, gagner beaucoup d'argent) ;
- qu'ils soient organisés en une structure hiérarchisée et puissent être atteignables en partiellement (ex : aller au cinéma, puis aller au restaurant).

Dans ce type de situation, les agents acceptent chacun d'abandonner une partie de leur(s) but(s) en conflit. Le compromis implique une attitude coopérative de la part des agents et ceux-ci pour parvenir à une solution acceptable disposent des techniques suivantes :

- la négociation : communication et échanges d'intérêts [Sycara, 1998] ;
- l'élaboration de conjectures communes [Fiorino, 1998].
- la relaxation de contraintes : élimination ou reformulation des contraintes problématiques [Liu et Sycara, 1997 ; Fox *et al.*, 1991] ;
- le retour aux hypothèses qui ont mené au conflit [Mason, 1989] ;

2.5.2 Élimination du conflit

L'élimination d'un conflit présuppose que les agents ou les évolutions naturelles du monde vont faire disparaître au moins un but de l'ensemble conflictuel (but d'un agent, croyance cruciale) de manière à ce qu'il ne puisse plus formellement exister⁸.

L'élimination naturelle d'un conflit se produit lorsque :

- les forces en conflit s'estompent (ex : les ressources financières ou humaines s'épuisent) et se détournent du conflit original [Simmel, 2003] ;
- une nouvelle ressource est découverte et rend caduc le conflit de ressources [Castelfranchi, 2000] ;
- une des parties en conflit disparaît [Le Marc, 1999].

Les agents peuvent éliminer un conflit :

- en inhibant les actions des autres agents (agression, guerre, persuasion, soumission, chantage, expulsion) [Castelfranchi, 2000 ; Sycara, 1990] ;
- en modifiant le point de vue d'un des agents par l'argumentation [Castelfranchi, 2000 ; Loui, 1987 ; Hewitt, 1986] pour obtenir un consensus [Chaudron *et al.*, 2000a] ;
- en redistribuant ou en ajoutant des ressources dans le cas d'un conflit extrinsèque [Castelfranchi, 2000].

Un cas particulier de suppression de conflit est l'utilisation de normes. Celles-ci définissent ce qui est " licite, tolérable ou inacceptable dans une situation donnée " [Pétard, 1999], et permettent de résoudre le conflit de manière protocolaire [Castelfranchi, 1992]. Un exemple est celui du Code de la route institué afin de réguler le comportement des automobilistes et d'éviter les conflits (collision...) en formulant des ordres de priorité ou des lois. La normalisation concerne également la définition de procédures (ex : procédure de vote pour élire le vainqueur du conflit, mise en place d'une commission...) [Vincke, 1989]. Cette technique a pourtant ses limites car elle fait naître de nouvelles possibilités de conflit (*i.e. conflit avec la norme*) et comme le remarque

⁸Si on reprend le conflit précédent de l'individu en conflit entre son travail et sa vie familiale, une résolution par élimination correspond soit à démissionner, soit à quitter sa famille pour se consacrer à son emploi.

Michel le Marc [Le Marc, 1999], elle est souvent illusoire⁹ : *“ l'idée de supprimer le conflit par la diminution des situations frustrantes ... à un niveau individuel et social, de faire disparaître l'agression par un renforcement des normes et des sanctions, tout ce réductionnisme psychologique, psychophysique, éthologique - avec Konrad Lorenz - ou psychanalytique - Mélanie Klein - a été contesté au moins par des sociologues. ”* ;

2.5.3 Détournement du conflit

Le détournement du conflit est une forme radicale d'élimination de conflit dans le sens où tous les buts ou croyances cruciales sont abandonnés.

La technique principale consiste à introduire un nouveau but, de plus grande importance sociale, fédérateur (*“ superordinate goal ”* [Sherif et Sherif, 1953], c.f. partie 2.4.3) qui provoque la collaboration des individus alors précédemment en conflit. Par exemple la guerre [Simmel, 2003] est une solution classique pour cristalliser la société et réduire les tensions intergroupes : *“ la guerre apparaît comme l'expression de conflits sociaux internes ... Cette idée est souvent exprimée sous une forme différente : la mobilisation contre un ennemi extérieur serait un moyen de gérer les conflits internes d'une société. Il est certain, par exemple, que la guerre étrangère permet de limiter les forces sociales qui poussaient à la rupture entre la bourgeoisie révolutionnaire jacobine et les sans-culottes des sections parisiennes. ”* [Touraine, 1974]

2.6 Conclusion

L'objet de ce chapitre est de dresser un état de l'art sur le conflit en nous appuyant essentiellement sur les approches de la psychologie sociale, de l'intelligence artificielle et de l'ergonomie.

Les différents points de vue sur cette notion ne permettent pas d'identifier des conditions nécessaires et suffisantes pour identifier clairement le conflit : on trouve de nombreuses définitions souvent *ad hoc*, essentiellement des classifications, et l'accent est mis surtout sa résolution. Une des raisons est que l'on s'intéresse traditionnellement plus au concept de coopération pour des raisons d'ordre épistémologique (en sciences sociales) et pratique (en IA et en ergonomie).

⁹L'adoption d'une loi sur la laïcité va permettre de régler le conflit formel relatif aux signes religieux ostentatoires, mais pas de réduire de manière magique le conflit psychologique pour les individus qui souhaitent continuer à arborer ces signes.

Des travaux dans le cadre de l'IA examinent toutefois les aspects structurels et génériques du conflit et dégagent plusieurs critères nécessaires pour observer un conflit :

- le ou les agents ont au moins deux buts ;
- ces buts sont reconnus par le ou les agents comme contradictoires ;
- ces buts conduisent le ou les agents à un choix ;
- ce choix entraîne une perte physique ou psychologique pour le ou les agents.

Par ailleurs, les théories sociales tissent le lien entre les aspects structurels et affectifs du conflit et montrent que leur enchevêtrement est la source de la dynamique du conflit :

- tout d'abord, les concepts lewiniens considèrent que chaque élément structurel du conflit (ou but selon Castelfranchi) exerce une force attractive ou répulsive sur les individus ;
- ensuite, la théorie de la dissonance est essentielle pour analyser le comportement individuel des agents en conflit personnel ou avec un groupe social ;
- l'approche empirique de Sherif exprime clairement le rapport entre comportements sociaux et conflit.

La suppression d'un conflit est par essence également complexe : elle ne peut se réduire à l'élimination des sources structurelles du conflit sous peine de revoir celui-ci réapparaître plus tard. Elle dépend aussi de la nature psychologique des agents, de l'environnement et du climat social.

Trois grandes catégories de techniques peuvent être cependant dégagées et consistent à :

- réduire le conflit, c'est-à-dire à relativiser l'importance du conflit ;
- éliminer le conflit, c'est-à-dire le supprimer formellement par le retrait de connaissances en conflit ;
- détourner le conflit, c'est-à-dire supprimer tout intérêt des agents pour les connaissances conflictuelles.

Cet état de l'art constitue une première approche pour envisager une synthèse des travaux relatifs au conflit dans l'idée d'en proposer ultérieurement (chapitre 4) une définition et une modélisation générique. Pourtant, nous souhaitons auparavant poursuivre notre étude du conflit sur un versant plus comportemental afin de mieux comprendre les enjeux psychologiques du conflit et les conséquences qu'il peut produire sur des agents tels que des pilotes. C'est l'objet du chapitre suivant consacré au lien entre la persévération et le conflit.

Chapitre 3

Persévération

3.1 Introduction

Le conflit, nous l'avons vu au chapitre précédent, provoque des attitudes psychologiques particulières comme des conduites agressives [Sherif et Sherif, 1953] et l'exclusion [Simmel, 2003]. Ces aspects émotionnels sont au centre de cette étude, car ils sont essentiels pour comprendre comment le conflit peut dégrader l'activité des pilotes. Des expérimentations réalisées en simulateur de vol dans le cadre de nos recherches¹ ont permis d'observer que les pilotes en conflit développent un type de comportement : une tendance à la persévération.

Ce comportement, bien qu'il ne soit jamais associé au conflit, est décrit dans la littérature scientifique, mais sa terminologie diffère selon les disciplines. Par exemple en ergonomie, on parle d'"erreur de fixation" [Keyser et Woods, 1990] ou d'"erreur diabolique" [Wanner et Wanner, 1999], en sociologie [Beauvois et Joule, 1999] et en neuropsychologie [Levine *et al.*, 1991] de "syndrome de persévération" et enfin les spécialistes de l'aviation emploient le terme de "fascination pour l'objectif" [BEA, 2000]. Si les appellations et les explications diffèrent, globalement une sémologie peut-être dégagée : la persévération est une focalisation exclusive du raisonnement et de l'attention sur la réalisation d'un but (même si celui-ci est dangereux).

Nous verrons dans ce chapitre les différents points de vue théoriques sur la persévération au travers d'une revue des disciplines qui s'intéressent au facteur humain (sociologie, psychologie, ergonomie, neuropsychologie). Ensuite, dans le même esprit pluridisciplinaire, nous tenterons d'apporter des explications pour comprendre le lien entre le conflit et la persévération. Enfin, nous examinerons les solutions proposées en ergonomie pour empêcher

¹Ces expériences sont décrites au chapitre 5 et au chapitre 7.

l'apparition de ce comportement, dangereux et à l'origine de nombreuses catastrophes.

3.2 Théorie de la persévération

3.2.1 Approche sociologique de la persévération

Lors du procès destiné à juger la responsabilité de l'équipage du vol AA-1420 qui a écrasé l'appareil sur la piste de Little Rock en juin 99 après avoir persévéré trois fois autour du terrain malgré des conditions effroyable (orages violents centrés sur la piste, pluie diluvienne, vents de côté supérieur à 20 noeuds, cisaillement de vent) et en dépit d'une capacité en carburant qui permettait de se dérouter sur un aéroport sûr, une enquête a été commandée au M.I.T. pour déterminer si le comportement de ces pilotes correspondaient à une tendance généralisée en aviation. Cette étude [Rhoda et Pawlak, 1999] qui porte sur 2000 approches en condition d'orage montre des résultats pour le moins inquiétant : deux tiers des équipages persévèrent dans un atterrissage en dépit des règles de sécurité et ce comportement est corrélé avec trois variables :

- s'ils suivent un autre avion ;
- si c'est la nuit ;
- si leur vol a été retardé d'au moins un quart d'heure.

Par ailleurs, une étude en aviation générale menée par le Bureau Enquêtes-Accident [BEA, 2000] appelée "objectif : destination" s'est intéressée à un type d'accident où les équipages ont manifesté une forte volonté d'arriver à destination alors que les conditions météorologiques ou l'état de l'appareil ne leur permettait pas. Les spécialistes qualifient ce genre de comportement de "fascination pour l'objectif" : dans chacun des accidents analysés, les pilotes étaient absolument décidés à se rendre à des rendez-vous professionnels ou personnels prévus de longue date. Cette étude porte sur la période 1991-1996 (c.f. tableau 3.2.1) durant laquelle 60 accidents répondant aux critères précédents ont été dénombrés.

Si l'on rapporte ces valeurs aux événements aériens qui se sont produits en aviation générale pour la même période (c.f. tableau 3.2.1), les accidents analysés représentent 4,5 % du total des accidents en moyenne, mais occasionnent 41,5 % du total des décès !

Une autre point du rapport mentionne que plus l'incident (panne, dégradation de la météo...) se passe à proximité de l'aérodrome d'arrivée, plus il est difficile pour les pilotes de renoncer à atteindre la destination, c'est-à-dire qu'ils vont perséverer encore plus intensément pour s'y rendre en

TAB. 3.1: "Objectif : destination. 1991-1996", Source : BEA

	1991	1992	1993	1994	1995	1996
accidents	11	12	11	9	11	6
accidents mortels	5	9	9	7	5	5
morts	18	26	21	11	10	14
blessés	2	1	3	0	2	0

TAB. 3.2: Pourcentage de victimes causées par la fascination pour l'objectif

1991-1996	Total	Objectif-destination	Pourcentage
accidents	1325	60	4,5 %
morts	240	100	41,5 %

dépit de la réglementation aérienne.

La littérature aéronautique militaire et civile décrit également des cas symptomatiques de persévération chez des équipages constitués d'un pilote chevronné et d'un copilote novice. Dans ces situations, on retrouve le même mécanisme : le pilote expérimenté commet une erreur grave qu'il s'entête à ne pas reconnaître afin de ne pas perdre la face ; de son côté le copilote, soucieux de ne pas critiquer un chef prestigieux, n'ose pas non plus la relever. Cet état de *statu quo*, s'il n'y a pas l'intervention d'un tiers (le contrôleur aérien) se termine généralement par la perte de l'appareil et parfois de l'équipage. L'étude des accidents aériens militaires pour les années 1993 et 1994 [Grau, 1994 ; Grau, 1995] montrent que sur 12 accidents imputés au facteur humain, 3 accidents sont directement liés à ce type de situation.

Le dernier type de persévération à caractère sociologique trouve sa source dans la volonté d'un individu ou d'un groupe d'individus de "bien faire" ou d'"être bien vu" vis-à-vis d'un autre groupe. L'accident militaire suivant est caractéristique de ce genre de situation :

Dans un contexte de guerre, un pilote d'avion d'arme se prépare à faire un atterrissage qu'il tient particulièrement à réussir : 15 jours auparavant il a été sanctionné pour avoir abîmé sa machine alors qu'il se posait. Le désir de bien faire vis-à-vis des autres pilotes de la coalition l'amène à se surcharger inutilement en utilisant par exemple ses modes automatiques d'accrochage radar pour surveiller son espacement avec les autres

appareils dans le circuit. Parallèlement il reçoit des ordres ambigus du contrôle qu'il a du mal à interpréter. La situation est telle que le pilote aurait dû annuler son atterrissage, mais obnubilé, le pilote décide de continuer son approche et se pose train rentré. Une action réflexe lui permet toutefois de remettre les gaz en minimisant les dégâts sur son appareil.

L'ensemble des trois catégories décrites (fascination pour l'objectif, jeu de hiérarchie, volonté de bien faire) relève des théories de l'engagement social et de la soumission [Festinger, 1957 ; Beauvois et Joule, 1999]. Ces auteurs ont montré expérimentalement l'"escalade d'engagement", phénomène qui traduit la tendance que manifestent les individus à s'accrocher à leur première décision même lorsqu'elle est clairement remise en cause par les faits. Chacun des cas étudiés ci-dessus montre que les pilotes ou équipages se sont sentis engagés vis-à-vis d'eux-mêmes ou d'une tierce personne :

- dans le premier cas, les pilotes ont persévéré pour atteindre la destination finale afin de pouvoir se rendre à un rendez-vous prévu depuis longtemps ou pour amener à destination les passagers et respecter les intérêts de leur compagnie. Les résultats du BEA sur la tendance des pilotes à persévérer à proximité de leur destination finale sont cohérents avec les analyses de Beauvois et Joules [Beauvois et Joule, 1999] qui postulent que plus le coût (durée, argent, effort physique ou psychologique) de l'engagement est fort, plus il est difficile de renoncer à un objectif que l'on s'est fixé ;
- dans le deuxième cas, le pilote expérimenté engage sa responsabilité et sa renommée dans les décisions pour la conduite de l'avion ; décisions qui ne peuvent être que bonnes aux yeux du copilote puisqu'elles sont prises par quelqu'un qu'il admire ;
- dans le dernier cas, le pilote a engagé ses qualités professionnelles pour prouver à sa hiérarchie ou à ses collègues qu'il est à la hauteur de sa tâche.

3.2.2 Bases cognitives de la persévération

Les activités telles que le pilotage d'avions, la conduite d'une centrale chimique, la réalisation d'anesthésie sont qualifiées de conduite en situation dynamique [Cellier, 1996], c'est-à-dire des activités où le processus contrôlé évolue en permanence (déplacement des avions, transformation des produits chimiques, état clinique du patient). Ces activités supposent que les opérateurs actualisent leur représentation de la situation, ce qui les oblige à intégrer des données nouvelles, parfois incertaines ou incomplètes. Le danger de ce type d'activité est que les opérateurs peuvent être amenés à commettre des erreurs de fixation [Keyser et Woods, 1990], définies comme une incapacité pour un

opérateur à réviser de manière appropriée sa représentation de la situation. Ces auteurs distinguent trois types d'erreurs de fixation :

- type 1 : l'opérateur doit réaliser un objectif mais il est incapable de se décider parmi l'éventail des possibilités. C'est le cas classique en aviation générale où un pilote en panne ne sait sur quel champ il peut se "vacher" (l'un à l'air boueux, l'autre est peut-être trop court...);
- type 2 : l'opérateur est bloqué sur une stratégie et n'arrive pas à en sortir, il reproduit obstinément les mêmes séquences d'actions sans pouvoir les contrôler ;
- type 3 : l'opérateur est persuadé que sa stratégie est la bonne, il ne tient pas compte des informations qui l'entourent ou n'a pas confiance en elles.

Une des explications admises pour expliquer ce phénomène [Broadbent, 1958 ; Amalberti, 1996 ; Spérando, 1975] est la théorie des ressources limitées : l'opérateur ne peut traiter toutes les informations qui l'entourent, seules les données pertinentes pour répondre aux exigences de la tâche sont retenues. Ce fonctionnement à l'économie peut se révéler dangereux lorsqu'un opérateur filtre trop d'informations et ne relève pas la pertinence d'un nouveau problème ou bien au contraire l'opérateur porte trop d'attention sur la résolution d'un problème en oubliant le processus dans sa globalité. Ainsi, pour [Keyser et Woods, 1990], l'erreur de fixation est une gestion inadaptée des mécanismes attentionnels. Ces auteurs avancent qu'il existe un certain nombre de précurseurs qui favorisent ce genre d'erreurs : la pression temporelle qui engendre le stress, la fatigue et la charge de travail.

3.2.3 Bases neurologiques de la persévération

La psychologie cognitive et l'ergonomie fournissent des critères précis pour exprimer le risque qu'un opérateur commette des erreurs (nombre maximal d'heures de travail, quantité de stimuli possibles à surveiller en même temps...), toutefois les modèles de ces disciplines pour expliquer les phénomènes de production d'erreur comme la persévération relèvent plus souvent de la métaphore que de véritables explications scientifiques réfutables. Pour Camus [Camus, 1996] "*la métaphore du filtre attentionnel de Broadbent [Broadbent, 1958] est limitée car elle institue un niveau périphérique ou goulot d'étranglement qui n'a jamais pu être mis en évidence [...] quant à la métaphore des ressources, si commode, trop commode, elle se trouve limitée par son incapacité à expliquer l'inverse et son contraire [...] mais aussi par l'invraisemblance des opérations changeant l'énergie en processus.*" Il manque à ces métaphores un rattachement au substrat biologique sur lequel elles portent.

La neuropsychologie, en revanche, s'attache à décrire les structures neurales qui sous-tendent les fonctions cognitives (attention, mémoire...) Sa méthode repose sur l'analyse des correspondances entre des lésions cérébrales d'un côté, et des perturbations cognitives, émotionnelles et comportementales de l'autre. Par exemple, l'étude du lobe frontal (c.f. figure 3.1) et en particulier du cortex préfrontal est très intéressante pour comprendre les mécanismes de persévération.

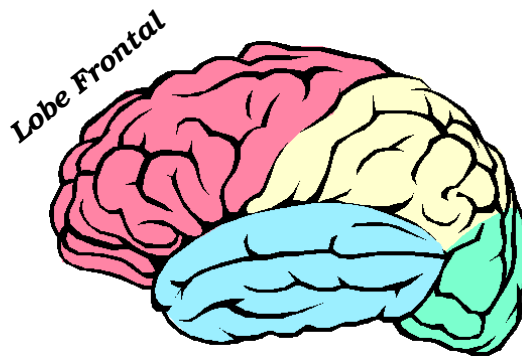


FIG. 3.1: Coupe sagittale du cerveau : le lobe frontal

En effet, le cortex préfrontal, bien qu'entretenant des connexions avec de nombreuses parties du cerveau, présente la caractéristique de n'être ni le départ de voies motrices, ni l'aboutissement de voies sensorielles. Ceci indique qu'il reçoit des informations de haut niveau de traitement et joue un rôle de contrôle avant tout.

Cette activité de contrôle s'exerce à travers la mise en œuvre des actions par l'anticipation, le choix des buts à atteindre, la planification, la surveillance du déroulement et la vérification des résultats obtenus [Eustache et Faure, 2000]. Par voie de conséquence, la dégénérescence de cette partie du cortex entraîne des perturbations du contrôle exécutif pour planifier, prévoir et s'adapter aux changements de l'environnement [Gil, 1996]. D'un point de vue comportemental, ce syndrome se traduit entre autres, par une aboulie (incapacité décisionnelle) et de la persévération à produire la même réponse motrice ou à s'enfermer dans une décision.

Il est intéressant de remarquer que ces réponses comportementales s'apparentent respectivement aux erreurs de fixation de type 1, 2 et 3 observées chez des opérateurs en situation dans [Keyser et Woods, 1990]. Ce rapprochement entre les types d'erreurs décrites en ergonomie et des troubles neuropsychologiques a été constaté par certains auteurs [Brown et Marsden, 1991 ; Pastor, 2000]. Ces deux études ont mis en évidence des contre-performances similaires avec une tendance à la persévération dans la réalisation d'une même

tâche chez un groupe constitué de patients présentant des lésions frontales et un groupe constitué de sujets normaux stressés ou fatigués. Existerait-il un “ *continuum cognitif* ” entre des opérateurs stressés ou fatigués et des patients cérébrolésés comme le suggère Pastor [Pastor, 1999] ?

3.2.4 Persévération et théorie de l’inhibition

Décider reflète d’une aptitude à choisir la meilleure stratégie, et sous-tend une capacité à inhiber celles qui ne sont pas adaptées. Houdé *in* [Berthoz, 2003] déclare : “ *Je pense donc j’inhibe. La mémoire est une jungle où l’on trouve des stratégies adéquates, mais aussi des stratégies dangereuses. Il y a des proies et des prédateurs, et l’intelligence exige des processus d’activation, de coactivation, mais aussi d’inhibition.* ”

Le test de Stroop [Stroop, 1935] est un bon exemple pour mettre en évidence ce mécanisme d’inhibition :

BLEU **ROUGE** **VERT** **JAUNE**

FIG. 3.2: Test de Stroop : une des consignes consiste à “ nommer le plus rapidement possible la couleur de l’encre avec laquelle est écrit chaque mot ”.

La difficulté dans cette tâche consiste à réussir à inhiber la lecture du mot (“ Bleu ”) pour donner la couleur de l’encre (“ Rouge ”). De nombreuses études menées sur les jeunes enfants [Piaget et Seminska, 1941 ; Bastien, 1997 ; Houdé, 1995] montrent la difficulté pour ces jeunes sujets à répondre correctement dans des tâches de discrimination qui supposent d’inhiber des réponses “ naïves ” en faveur d’une réponse faisant appel au raisonnement logique. De même, des expérimentations conduites avec des patients présentant des lésions frontales [Rolls, 1994] expriment l’impossibilité pour ses sujets à s’adapter à des changements de règles dans des jeux de cartes : ils sont incapables d’inhiber la première règle apprise en début d’expérience ce qui les conduit à persévérer en appliquant une mauvaise stratégie et ce malgré qu’ils soient souvent conscients de leur erreur.

La persévération est donc avant tout un trouble de l’inhibition [Berthoz, 2003 ; Eustache et Faure, 2000 ; Gil, 1996], et ce quels que soient ses différentes acceptations en fonction du niveau de complexité du comportement qu’elle affecte [Berthoz, 2003] :

- au niveau le plus bas, une *persévération continue* qui consiste en l’itération irrépressible d’actes moteurs élémentaires (ex : dessiner des cercles en série) ;

- au niveau intermédiaire, une *persévération récurrente* qui consiste en la répétition de réponses préalablement produites mais inadaptées à la situation ;
- au niveau supérieur, une *persévération d’engluement* qui consiste en une incapacité de passer d’une tâche à une autre.

Cette argumentation sur la théorie de l’inhibition et les résultats de neuropsychologie exposés dans cette section nous amène à définir la persévération comme suit :

DÉF. 3.1 (Persévération) *La persévération désigne l’incapacité pour un agent d’inhiber un but et d’en engager un nouveau pour répondre de manière adaptée aux sollicitations de l’environnement.*

3.3 Conflit et persévération

La question que l’on est en mesure de se poser est la suivante : “ Pourquoi le conflit mène-t-il à la persévération ? ”. En effet on peut se demander comment l’apparition d’incohérences durant le vol va pousser l’équipage à s’enfermer dans des décisions parfois aberrantes et souvent jusqu’à la perte de leur appareil et de leurs occupants.

3.3.1 Explication neuropsychologique : le stress

L’apparition d’un conflit durant le vol induit indubitablement du stress pour l’équipage : par exemple, le vol ne se passe pas comme prévu, les données des différents systèmes de navigation sont contradictoires, l’équipage s’est perdu, la nuit est en train de tomber, la région survolée est particulièrement montagneuse et les réservoirs d’essence s’épuisent depuis deux heures que l’avion tourne. Dans ce prototype de scénario-catastrophe, l’équipage subit un fort stress puisque son existence et celle des passagers sont en jeu, stress d’autant plus grand que les pilotes ne disposent dans cette situation que d’une faible marge de manœuvre.

Tel que défini par le physiologiste Selye [Selye, 1950] en 1936, le stress ou Syndrome Général d’Adaptation est la réaction physiologique et psychologique d’alarme et de défense face à la menace et à l’agression. Cependant cet auteur élargit sa définition en insistant sur deux caractéristiques : premièrement, il s’agit d’une réaction identique quel que soit le type d’agression, deuxièmement cette réaction se produit non seulement face à une menace mais aussi en réponse à tout événement, à toute sollicitation de l’environnement, quelle que soit son importance. Si la réaction de stress est utile

puisqu'elle permet de focaliser l'attention sur un danger potentiel, néanmoins cette réaction est aussi connue pour ses effets négatifs sur les fonctions cognitives : dégradation des mécanismes attentionnels, tendance à la persévération [Eustache et Faure, 2000]. En effet, la présence de connexions privilégiées entre le système limbique² et le lobe frontal implique que les signaux de l'émotion peuvent perturber la capacité du lobe frontal à maintenir son homéostasie [Levine *et al.*, 1991 ; Selemon *et al.*, 1994]. Ces théories et observations cliniques apportent un éclairage intéressant sur le lien existant entre la dégradation des performances chez un opérateur stressé et les troubles de patients atteints de lésions du lobe frontal.

3.3.2 Explication psychologique : le sentiment de perte

Nous avons défini le conflit, comme l'impossibilité pour un agent ou un groupe d'agents d'atteindre un but important. Classiquement la résolution d'une telle situation entraîne la révision des buts portés par les agents en conflit dans le sens :

- d'un compromis où chaque agent fait des concessions sur les buts en conflit (par exemple les agents modifient en partie leur buts de manière à ce qu'ils ne soient plus conflictuels les uns avec les autres [Castelfranchi, 2000]) ;
- d'une soumission où certains des agents en conflit acceptent de laisser tomber totalement leur but au profit des autres agents [Castelfranchi, 2000].

Dans le cas d'un conflit interne où un agent est confronté à un choix parmi des buts exclusifs (c.f. conflit lewinien [Lewin *et al.*, 1939]), la résolution se traduit par la sélection d'un seul et unique but.

L'élimination du conflit se caractérise par une perte puisque les agents sont amenés à renoncer, au moins en partie, à leur but initial. On comprend donc aisément que ce type de situation débouche sur des comportements de persévération où chaque agent cherche à affirmer son but pour ne pas le perdre. Par ailleurs cette volonté de conserver un but est d'autant plus forte si les agents y sont particulièrement engagés (c.f. section 3.2.1).

3.4 Des solutions pour empêcher la persévération

La persévération est, nous l'avons vu, un comportement dangereux parce qu'il est difficilement prévisible et extrêmement robuste. Pour diminuer l'apparition de ce comportement dans les activités de conduite de processus, De

²Le système limbique est reconnu pour être l'un des sièges de l'émotion, impliqué entre autres dans la réaction de stress [Damasio, 1994]

Keyser et Woods [Keyser et Woods, 1990] insistent sur la nécessité d'identifier clairement *in situ* les types d'erreur de fixation (type 1, 2 ou 3) et de comprendre leur origine de manière à pouvoir exprimer des recommandations sur la formation, l'ergonomie des interfaces et la conception des interfaces :

- il apparaît, d'après ces auteurs, que le manque de connaissance ou d'entraînement (perte de qualification) amène les opérateurs à s'enfermer dans des réponses inadéquates. L'idée est de renforcer la connaissance des opérateurs par des cours et des mises en situations dynamique sur simulateur. Pour Wanner [Wanner et Wanner, 1999], il est impératif de placer au moins une fois des opérateurs en situation de persévération (en simulation) afin qu'ils aient une expérience de ce phénomène et de ses dangers ;
- Wanner [Wanner et Wanner, 1999] avance que la persévération est bien souvent la conséquence d'une interface homme-machine peu adaptée à son utilisateur où les informations sont mal présentées, confuses et compliquées à analyser. De Keyser et Woods [Keyser et Woods, 1990] ajoutent qu'un des problèmes majeurs est le déclenchement intempestif d'alarmes dans lesquelles les opérateurs finissent par ne plus avoir confiance. Or si ces alarmes se déclenchent pour prévenir d'un vrai problème, les opérateurs, habitués à les négliger, n'y prêteront pas attention. Une des solutions consiste à analyser sur le terrain les postes de travail, répertorier les problèmes d'interface et de "fausses alarmes" pour ensuite proposer des améliorations avec les concepteurs de ces systèmes ;
- La conception de système d'assistance (exemple : copilote électronique [Amalberti et Deblon, 1992]) est une voie intéressante pour améliorer les interactions homme-machine. Ces systèmes dits "intelligents" analysent l'activité de l'opérateur en temps réel pour l'assister en lui proposant des informations pertinentes en fonction de la tâche effectuée [Leroux, 1997 ; Le Blaye *et al.*, 2002] ou le protéger de ses erreurs [Chaudron *et al.*, 1999] en lui proposant des aides (message d'alerte, aides à la résolution de problème). Cependant ces systèmes nécessitent de modéliser toutes les situations de panne et d'erreur humaine mais aussi de tenir compte de la variabilité intra et inter-individuelle des opérateurs.

3.5 Conclusion

Reason [Reason, 1990] dit à propos de l'erreur humaine qu'elle est le revers inéluctable de nos processus mentaux. La persévération illustre parfaitement ce discours puisqu'à l'origine, ce mécanisme permet d'alerter, de focaliser l'attention sur un danger potentiel mais aussi de motiver le système cognitif jusqu'à l'élimination du problème. Pourtant cette obnubilation peut aussi

se révéler inadaptée lorsqu'un opérateur doit agir et surveiller un processus complexe dans toute sa globalité et sous forte pression temporelle.

Il apparaît fondamental de trouver des solutions pour éviter l'apparition de ce comportement lorsque des opérateurs supervisent des systèmes à risque tels que des centrales nucléaires ou des avions de ligne. Cependant la tâche est ardue car si d'un côté la manifestation comportementale de la persévération peut se réduire à une incapacité à se désengager d'un objectif, de l'autre côté les origines de ce comportement peuvent trouver des raisons sociologiques, psychologiques et neuropsychologiques. Cela implique de s'intéresser à toutes ces dimensions humaines pour éviter la survenue de ce phénomène, en agissant sur la formation des opérateurs (mise en situation en simulation) mais aussi en améliorant les interfaces hommes-machines. Un autre problème vient aussi de l'identification de la persévération elle même : Watzlawick [Watzlawick *et al.*, 1967] rapporte des cas où l'obnubilation a permis à des hommes de se sortir de situations défavorables, voire désespérées. En effet, il faut reconnaître que c'est souvent *a posteriori* que l'on peut juger s'il y a eu persévération ou persévérance en fonction des conséquences d'un événement.

Enfin, il faut admettre que la persévération amène le concepteur d'interface à un paradoxe apparent : si la persévération conduit l'opérateur à ignorer l'information pertinente qui l'entoure au profit de la réalisation de son objectif, comment espérer concevoir un mécanisme qui viendrait l'informer de son obnubilation ?

Chapitre 4

Modélisation des conflits dans l'activité de pilotage

4.1 Introduction

La prédiction de l'apparition d'erreurs dans les interactions homme-système est reconnue dans la communauté comme un point important pour maîtriser la sécurité des systèmes à risque. En dépit de la complexité de ces interactions et de la difficulté pour en prévoir les dégradations, il semble que certaines situations ou scénarios types puissent faire émerger des comportements stéréotypés qui mènent à l'accident :

- l'Inrets (Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité) partant du constat de l'existence d'invariants dans les accidents [Van Eslande *et al.*, 1997 ; Van Eslande, 2001], postule que le comportement des automobilistes est essentiellement conditionné par les infrastructures routières (longueur de la ligne droite, implantation du carrefour, emplacement de la signalisation, courbure de la route, visibilité...);
- J.C. Wanner [Wanner et Wanner, 1999], en faisant rejouer en simulateur des scénarios connus d'accidents aériens à des équipages de compagnie, montre que leur comportement est convergent, ce qui les amène quasi mécaniquement à commettre les mêmes erreurs qui les conduisent au même type d'accident.

La revue d'accidents tant militaires que civils indique également que l'apparition de situations psychologiques particulières comme les conflits [Pritchett et Hansman, 1997 ; Song et Kuchar, 2001], est un précurseur remarquable de dégradation de l'activité des équipages et est à l'origine de nombreux crashes¹. Nous proposons ici quatre cas :

¹Remarque : l'analyse des accidents est réalisée à partir du dépouillement des enregistreurs de paramètres récupérés sur les appareils. Lorsqu'il s'agit d'accidents dus à des erreurs de

- *Cas 1 : octobre 1996, à la suite d'une erreur de l'équipe de maintenance, l'équipage d'Aero Peru perd juste après le décollage toutes les informations sur la vitesse, le cap et l'altitude de son appareil. Bien qu'il s'agisse d'une panne grave, la situation n'est pas pour autant désespérée car les équipages sont entraînés à faire face à ce genre de problème et peuvent être guidés par la tour de contrôle. Cependant, un vif conflit éclate au sein de l'équipage et se traduit par une suite d'actions contradictoires (choix de routes différents, pilote automatique branché par le pilote, débranché par le copilote...) qui vont mener l'appareil à s'abîmer dans l'océan.*
- *Cas 2 : janvier 2000, après le décollage de Zurich d'un appareil de la Crossair, le contrôleur demande à l'équipage de rejoindre par un virage sur la gauche la balise Zurich-Est. Le copilote ordonne à l'ordinateur de bord (FMS) de calculer une route pour se diriger vers la balise sans toutefois préciser la direction du virage. Le commandant de bord suit la trajectoire proposée par le FMS en effectuant un virage de 42 degrés sur la droite (chemin calculé le plus court pour atteindre la balise). L'équipage est immédiatement rappelé à l'ordre par le contrôle qui rappelle que le virage doit se faire par la gauche. L'équipage est en conflit sur la direction à prendre et, enfermé dans cette contradiction, oublie de surveiller les paramètres vitaux (l'avion continue toujours à virer en suivant un plan de descente). Dans l'obscurité et sans détecteur de proximité sol (GPWS), l'avion finit par s'écraser dans un champ.*
- *Cas 3 : opération militaire, un avion de chasse doit se ravitailler en vol pour ensuite remplacer une patrouille amie. De fortes turbulences rendent le ravitaillement difficile, mais le pilote en conflit avec l'idée de ne pas pouvoir relever la patrouille alliée alors à court de carburant, se précipite sur le ravitailleur et effectue une manœuvre erronée qui le conduit à s'éjecter de son aéronef.*
- *Cas 4 : avril 2000, un appareil d'Air Philippines demande à la tour l'autorisation d'atterrir car la météo se dégrade et l'aéroport n'est pas équipé de système d'atterrissage sans visibilité. Alors que l'Air Philippines se présente en finale, le contrôle ordonne subitement à l'équipage de remettre les gaz en raison de la présence d'un aéronef sur la piste, mais stressé par l'idée de retenter un atterrissage dans de si mauvaises conditions, l'équipage entre en conflit avec la tour pour obtenir l'autorisation de se poser d'urgence. L'équipage obtempère finalement, mais tente d'effectuer un atterrissage par l'autre côté de la piste. De peur de perdre le sol de vue, l'équipage vole trop bas et l'avion percute une plantation.*

Ces accidents illustrent le danger de l'apparition de conflits durant le vol, et leur difficile gestion pour l'équipage qui doit à la fois continuer à piloter et

pilotage, les experts ne peuvent proposer que des explications plausibles sur le comportement des équipages et sur les mécanismes qui ont mené à la catastrophe. Les explications fournies ici ne sont donc que des suppositions sur ce qui a pu être à l'origine de la dégradation de l'activité des pilotes.

le résoudre rapidement dans un contexte d'incertitude et de stress. Mais ces accidents montrent combien il peut être intéressant de modéliser ces situations psychologiques de conflit puisqu'elles amènent quasi systématiquement à dégrader l'activité des pilotes, et souvent de manière récurrente comme le suggèrent les expérimentations de J.C. Wanner [Wanner et Wanner, 1999].

Nous proposons dans ce chapitre un modèle pour représenter les situations conflictuelles quels que soient les agents impliqués (pilote, copilote, contrôleur...) et les connaissances en jeu (procédures aériennes, données de l'interface...)

L'idée défendue dans cette thèse est qu'un conflit se produit lorsque des individus ne peuvent atteindre un but dans lequel ils se sentent particulièrement engagés. Cette vision du conflit est inspirée à la fois de concepts venant de l'intelligence artificielle et des sciences humaines et s'appuie sur des exemples concrets de conflits en aéronautique. Bien que nos applications soient clairement liées à l'aéronautique, le modèle présenté ici ne se limite pas à ce seul contexte et peut tout à fait trouver des applications dans d'autres disciplines.

4.2 Vers une définition du conflit

Nous montrons dans ce paragraphe qu'il est possible d'envisager une vision générique qui unifie les travaux sur le conflit. Nous proposons d'argumenter notre propos sur la base des théories que nous avons examinées au chapitre 2 et en nous appuyant sur les quatre accidents aériens évoqués précédemment.

4.2.1 Conflit et agents

Les conflits se produisent au sein d'un agent (conflit interne) ou entre agents (humains ou artificiels). Pour les cas étudiés :

- Cas 1 : le conflit se produit entre le pilote et le copilote ;
- Cas 2 : c'est un ensemble d'agents qui sont en conflit : l'équipage, l'interface homme-machine, le contrôleur aérien ;
- Cas 3 : c'est le pilote qui est en conflit interne ;
- Cas 4 : c'est l'équipage qui est en conflit avec le contrôle aérien.

À partir de ces cas et de l'étude des travaux du domaine, il est possible de dégager une typologie des conflits en aéronautique. En résumé, ceux-ci peuvent apparaître :

- au sein d'un pilote (ex : Cas 3) ;
- entre des agents humains :

- au sein de l'équipage (ex : *Cas 1*),
- au moins deux équipages (ex : conflit de trajectoire [Leroux, 1997]),
- le contrôle aérien et au moins un équipage (ex : *Cas 4*);
- entre des agents humains et artificiels :
 - l'équipage et les systèmes embarqués (ex : conflit d'autorité entre l'équipage et le pilote automatique [Sarter et Woods, 1994]),
 - les équipages, le contrôle et les systèmes embarqués (ex : *Cas 2*).

4.2.2 Conflit et buts impossibles

Le cadre théorique sur la question du conflit (c.f. chapitre 2) a montré que ce concept n'a pas de définition unique :

- “il y a conflit lorsqu'une décision ne peut être prise par les procédures habituelles” [March et Simon, 1958];
- Cholvy *in* [Chaudron *et al.*, 2000b] et Castelfranchi [Castelfranchi, 2000] associent conflit et contradiction entre buts;
- le conflit est lié à un problème de ressource [Keyser, 1996; Castelfranchi, 2000];
- [Chaudron *et al.*, 2000b] voient dans la différence de point de vue l'essence du conflit.

Une relecture possible de ces acceptions du conflit, dans une tentative pour les unifier, est de considérer que celles-ci recouvrent toutes l'idée générique d'une impossibilité pour un agent ou un groupe d'agents d'atteindre un but² fixé [Dehais *et al.*, 2003].

Ces buts poursuivis, si on analyse les définitions énoncées plus haut, ne peuvent respectivement être atteints car les agents :

- ne possèdent pas les connaissances nécessaires;
- ont des actions contradictoires;
- n'ont pas les ressources nécessaires;
- n'arrivent pas à se mettre d'accord.

L'impossibilité pour un agent ou un groupe d'agents d'atteindre un but est également la source du conflit dans les théories en psychologie sociale examinées en chapitre 2 (c.f. 2.4) :

- dans l'approche lewinienne [Lewin *et al.*, 1939], les individus ont des aspirations qu'ils ne peuvent satisfaire en raison des contraintes exercées par leur environnement et c'est ce qui les place dans une situation conflictuelle. Reprenons un exemple utilisé en chapitre 2 pour illustrer la théorie des champs de Lewin : un jeune homme souhaite accéder au

²Nous reprenons ici la notion de but au sens de Castelfranchi [Castelfranchi, 2000] (c.f. partie 2.3.2).

rang d'adulte (champ attractif) mais doit passer par un rite d'initiation qui l'effraye (champ répulsif). Ce jeune homme est en conflit car son but désiré (devenir adulte et ne pas souffrir) est impossible à atteindre du fait des règles de sa société ;

- la dissonance cognitive [Festinger, 1957] exprime un état de conflit lorsque des individus se retrouvent dans des situations qui ne sont pas conformes avec leur but, ce qui les conduit à en revoir les propriétés ;
- dans l'approche empirique de Sherif [Sherif et Sherif, 1953], les groupes sont mis dans une situation de compétition. Les groupes sont en conflit car pour atteindre leurs buts, ils doivent posséder une ressource unique et non partageable (ex : jeu du fanion).

Ce propos se retrouve dans les quatre accidents aéronautiques :

- *Cas 1 : le but de retourner à la base ne peut être réalisé car les actions du commandant de bord (brancher le pilote automatique, prendre un cap) et du copilote (débrancher le pilote automatique, prendre un autre cap) s'opposent ;*
- *Cas 2 : le but de se rendre sur la balise Zurich-Est ne peut être satisfait car la direction proposée par l'ordinateur de bord (virage à droite) et celle ordonnée par le contrôleur (virage à gauche) sont contradictoires et empêchent l'équipage de prendre une décision ;*
- *Cas 3 : les buts du pilote de chasse (se ravitailler, relever une patrouille) sont incompatibles du fait de la situation (mauvaise météo) qui rend le ravitaillement impossible ;*
- *Cas 4 : le but de l'équipage (atterrir) est rendu irréalisable en raison de la présence d'un avion sur la piste.*

4.2.3 Conflit et conséquences

Cependant le fait qu'un but ne puisse être atteint ne représente qu'une condition nécessaire pour le conflit. Par exemple, dans le domaine du pilotage [Song et Kuchar, 2001] il est admis que l'apparition d'incohérences (panne, météo, données ambiguës de l'interface) ne s'oppose pas forcément à la poursuite de la mission [Dehais, 2002]. Ces incohérences deviennent conflictuelles seulement si elles remettent en cause la mission ou la sécurité de l'équipage, comme le montrent les quatre accidents aériens :

- *Cas 1 : les incohérences des indicateurs de vol ont eu des conséquences directes sur la poursuite du vol et ont conduit au conflit d'autant plus qu'elles se sont produites pendant la nuit empêchant la localisation de la piste à vue et rendant difficile l'évitement du relief ;*
- *Cas 2 : l'apparition d'une incompréhension sur la trajectoire à prendre a eu des conséquences sur l'activité des pilotes car elle s'est produite de nuit et lors du décollage, une phase de vol particulièrement délicate (forte concentration de l'équipage, faible marge de manœuvre). Dans d'autres circonstances, par*

exemple en plein jour et en phase de croisière, ce type d'incohérence (aller à droite ou à gauche) aurait vraisemblablement été sans conséquence pour l'équipage ;

- *Cas 3 : l'impossibilité pour le pilote de se ravitailler a des conséquences directes sur la réalisation de sa mission c'est-à-dire relever rapidement la patrouille et assurer la surveillance et la protection des civils, provoquant ainsi un conflit interne chez le pilote ;*
- *Cas 4 : l'atterrissage par mauvaise visibilité sur un aéroport non équipé de dispositif d'atterrissage aux instruments et sur une piste occupée par un autre appareil a eu des conséquences sur l'activité des pilotes, et a en ce sens produit une situation conflictuelle pour l'équipage.*

DÉF. PRÉLIMINAIRE 4.1 (Conflit) *On dira qu'un but est important si sa réalisation est liée :*

- *à un devoir social (ex : arriver à l'heure) ;*
- *à une obligation (norme, loi, procédure...);*
- *à la survie ;*
- *au besoin de satisfaire la rationalité³ du ou des agent(s) en interaction ;*

4.2.4 Vers une définition informelle du conflit

Définitions

Notre argumentation nous amène à poser les définitions préliminaires suivantes pour décrire le conflit. Ces acceptions permettent d'intégrer la notion d'agent et l'aspect psychologique d'empêchement lié à l'impossibilité de réaliser un but :

DÉF. PRÉLIMINAIRE 4.2 (Conflit) *Un conflit est un état du monde où un ou plusieurs agents ne peuvent atteindre un but important.*

DÉF. PRÉLIMINAIRE 4.3 (Agent en conflit) *On dira qu'un agent A1 est en conflit avec un agent A2 si au moins un but de A2 empêche l'agent A1 d'atteindre son propre but.*

Remarque

- Le fait qu'un but ne puisse être atteint a pour origine [Dehais, 2002] :
- un manque de connaissance ou une incertitude (ex : ne pas être sûr de la route à prendre pour arriver à destination) ;

³Selon Festinger [Festinger, 1957] qui postule qu'un individu cherche toujours à être cohérent avec son environnement.

- l'inexistence d'une norme ou d'une procédure⁴ ;
- l'existence de connaissances contradictoires (ex : devoir réaliser deux actions exclusives au même moment à deux endroits différents) ;
- une action interférente d'un autre individu, d'un autre groupe d'individus ou d'un élément naturel (ex : présence d'un avion sur la piste, cisaillement de vent sur une piste) ;
- une panne d'un système physique (ex : panne d'essence qui empêche d'atteindre une destination) ;
- une erreur humaine (ex : mauvais réglage d'une fréquence radio).

4.3 Modélisation des conflits : application à l'aéronautique

Dans cette partie, nous proposons un modèle du conflit de manière à pouvoir détecter son apparition dans les interactions humaines ou dans les interactions hommes-machines. Directement inspirée des réflexions de la section précédente, la détection de conflit consiste à analyser la cohérence entre l'activité réelle des pilotes et une activité de référence, cette dernière représentant les buts de la mission (plan de vol) et les procédures relatives à l'exécution conforme de cette mission.

4.3.1 Préambule

On postule que les conflits n'apparaissent qu'en présence d'agent(s) (artificiels ou humains) cognitifs intentionnels. En sciences cognitives [Houdé et al., 1998] "*l'intentionnalité est la propriété qu'ont les états mentaux de représenter des états de choses du monde, soit réalisées (c'est le cas des croyances, dont le contenu fixe l'état du monde représenté), soit à réaliser (comme les désirs, dont le contenu fixe l'état que le monde devrait atteindre)*".

Pour représenter la connaissance des agents, nous utiliserons la notion d'*attitude propositionnelle* [Austin, 1962 ; Searle, 1969 ; Fodor, 1988] "*qui recouvre la notion de croyance, de désir, d'intention, [...], et qui ont en commun d'être identifiés par leur contenu propositionnel*" [Houdé et al., 1998]. Par exemple, la croyance

⁴Par exemple, c'est l'absence de procédures aériennes sur l'utilisation du système d'anticollision (TCAS) qui est directement à l'origine de l'accident du Lac de Constance (juillet 2002) : face aux ordres contradictoires et simultanés du TCAS ("*monter*") et du contrôleur aérien ("*descendre*"), il était impossible à l'équipage de prendre une décision pour éviter l'avion qui arrivait dans la direction opposée. Depuis cet accident grave, la norme établit que les ordres du TCAS prévalent sur les directives du contrôle aérien.

que le moteur est en panne, est représentée par la proposition : le moteur est en panne.

Dans la suite, nous noterons AP les attitudes propositionnelles. Il s'agit d'une notion générique qui ne signifie pas que les particularités, singularités et rapports entre les différents types d'AP (croyances, buts, désirs...) sont niés, mais bien que l'on essaie de caractériser ce qu'elles peuvent avoir de commun, en l'occurrence d'être les objets par lesquels le conflit va exister.

DÉF. 4.1 (Attitude propositionnelle) *Une attitude propositionnelle est un triplet (A, K, T) , où A est l'agent porteur de la connaissance, K est un ensemble de propriétés et T est l'intervalle de temps durant lequel les propriétés de K sont vérifiées.*

4.3.2 Modélisation des connaissances

C'est la comparaison de l'activité des pilotes à l'activité de référence qui va nous permettre de détecter les conflits. Dans ce sens, nous proposons de définir l'activité de référence à travers trois catégories d'AP (AP_but, AP_plan et AP_cruciale) qui permettent de représenter les différents états désirés du monde, les actions possibles sur le monde et les normes des équipages. Parallèlement, l'observation de l'activité de pilotage à proprement parler est modélisée à travers une quatrième catégorie d'AP : les AP_observations. Détaillons ces catégories.

AP_but

En logique modale, les buts sont définis comme des états possibles du monde [D'Ausbourg *et al.*, 1999]. De manière générale, un agent n'a accès qu'à une représentation phénoménale du monde, c'est-à-dire, à propos de son environnement. Un but correspond donc à un ou plusieurs états du monde possible dont la représentation est en adéquation avec les objectifs (désirs, intentions, aspirations, obligations...) de l'agent. L'ensemble des états possibles du monde pour un agent se limite au domaine des connaissances ou des croyances qu'il possède (on ne peut pas avoir comme but "être à Paris" si on n'a pas la connaissance que Paris existe). Plutôt que de considérer directement les états mentaux intentionnels des agents (désir, intention...), nous ne manipulerons que les états objectifs du monde. Cela nous permet alors de traiter la notion de but sans faire d'hypothèse sur la représentation mentale que s'en fait l'agent.

DÉF. 4.2 (AP_but) *Une AP_but (A, K, T) décrit un état du monde K qu'un agent ou un ensemble d'agents A s'engage à vérifier pendant l'intervalle de temps T .*

Par exemple, $ap_but(\text{pilote}, \text{atterrir}(\text{Blagnac}), \langle 180, 240 \rangle)$ traduit que le pilote a pour but d'atterrir dans l'intervalle de temps $[180, 240]$.

AP_plan

Classiquement, le concept de plan est défini comme un ensemble ordonné ou partiellement ordonné d'actions dont l'exécution permet d'atteindre un nouvel état du monde. Ainsi dans [Pollack, 1990], le plan est un concept composite lié aux notions d'intention et de croyance : avoir un plan, c'est désirer atteindre un état du monde et c'est aussi croire que l'application de ce plan va permettre d'atteindre cet état du monde. Un certain nombre d'auteurs [Pollack, 1990 ; Grosz et Kraus, 1999] vont distinguer ce qui relève des actions à suivre de ce qui relève de l'intention d'agir et utilisent les termes *recette* (" *recipe* " en anglais) et *plan* pour les désigner respectivement.

Dans notre modélisation, nous nous limitons à voir un plan comme une procédure (ou *recette*) pour atteindre un état du monde, en le dégageant de toute notion d'intention. Cette position éliminativiste repose bien sur l'inexistence de moyens d'investigations scientifiques (tant théoriques que pratiques) pour identifier formellement un état mental tel que l'intention : il nous apparaît problématique d'analyser le comportement d'agents à partir d'états mentaux inobservables :

DÉF. 4.3 (AP_plan) Une *AP-plan* (A, K, T) est telle que K ensemble structuré (par un ordonnancement, des priorités, des exclusions mutuelles) d'actions destiné à amener un agent ou un ensemble d'agents A à vérifier une *AP_but* durant un intervalle de temps T .

Ainsi, $ap_plan(\text{copilote}, \text{atterrir}(\text{Blagnac}) \langle \text{tour_contactée}, \text{train_sorti} \rangle, \langle 180, 240 \rangle)$ traduit que pour atterrir le copilote doit contacter la tour puis sortir le train dans l'intervalle de temps $[180 ; 240]$.

AP_cruciale

Il existe des règles dont la violation entraîne des conséquences graves sur le plan social, individuel (psychologique ou biologique) pour l'agent qui les transgresse. Ainsi et particulièrement dans le domaine aéronautique, le comportement des pilotes est codifié par des règles qui doivent être respectées pour que le vol se déroule sans conséquences pour l'appareil et ses occupants ou la compagnie :

- les autres types de règles sont définies par des normes et relèvent de l'obligation (ex : sortir le train pour la phase d'atterrissage). Leur transgression a des conséquences graves pour celui qui les enfreint (incidents, accidents, perte d'emploi, procès...);
- certaines de ces règles sont imposées par les compagnies aériennes et relèvent du devoir (ex : respecter les horaires, économiser le carburant). Leur transgression vaut des sanctions pour celui qui les enfreint (blâme, réprimande...)

À partir de ces notions, nous définissons une classe d'attitudes propositionnelles dites *cruciales* et qui ont pour propriété de réguler les attitudes propositionnelles et de statuer si celles-ci sont conflictuelles. En principe, toutes les normes et procédures de vol sont connues pour chaque avion, et c'est en détectant au minimum leur transgression que l'on peut évaluer les conséquences pour les équipages (panne d'un système, blâme, accident...)

DÉF. 4.4 (AP_Cruciale) Une AP_cruciale (A, K, T) est telle que l'ensemble K de propriétés doit être impérativement vérifiée par l'agent ou l'ensemble d'agents A durant l'intervalle de temps T .

Par exemple, $ap_cruciale(\text{pilote}, \text{atterrir}(\text{Blagnac}) <\text{suivre_ordre_controleur}>, <180, 240>)$

traduit qu'il est impératif pour le pilote de respecter les ordres de la tour de contrôle lors de la phase d'atterrissage : ne pas respecter cette consigne peut avoir pour conséquence un blâme pour le pilote ou dans le pire des cas entraîner une collision.

AP_observation

En ergonomie, lorsqu'on s'intéresse à l'analyse de l'activité d'un opérateur, on est contraint de distinguer la tâche à réaliser de l'activité à proprement parler [Leplat, 1985]. La tâche correspond à ce qui est *prescrit*, comme les procédures par exemple, et l'activité se rapporte à ce que *fait réellement* l'opérateur sur le terrain. Cette distinction tient au fait qu'il existe de manière assez systématique des écarts entre la tâche et l'activité, non pas à cause d'erreurs, mais plutôt parce que les opérateurs adaptent les procédures aux contraintes et aux nombreux imprévus qu'ils rencontrent dans la réalisation de leur travail et d'autre part parce que les procédures ne donnent pas d'information précise sur le déroulement réel de l'activité.

C'est l'objet des AP_observation que de justement saisir cette activité réelle des opérateurs et en particulier ici celle des pilotes.

DÉF. 4.5 (AP_observation) Une *AP_observation* (A, K, T) est telle que K décrit les faits perçus et déduits à partir de l'observation de l'activité d'un ou plusieurs agents A pendant l'intervalle de temps T .

Par exemple, *ap_observation*(pilote, <train_sorti, cap(180), vitesse(80)>, 44) ; se traduit par qu'au temps 44, le pilote a son train sorti, son cap est à 180 degrés et sa vitesse est de 80 knots.

4.3.3 Détection de conflit

La détection de conflit est issue d'un processus de surveillance des AP du pilote. Soit t un instant dans le processus de surveillance, ce processus se déroule en trois étapes :

1. détecter les ensembles d'AP qui ne sont pas cohérents au temps t ;
2. détecter les conflits étant donné les AP cruciales concernées au temps t ;
3. identifier le conflit en exprimant les différentes possibilités de résolution.

Afin d'illustrer le principe de la détection de conflit, nous proposons d'analyser l'accident de la Crossair, présenté en début de chapitre. Dans cette catastrophe, l'équipage, juste après le décollage, doit rejoindre la balise Zurich Est, mais hésite entre tourner à droite comme le propose le calculateur de bord (FMS) et virer à gauche conformément aux ordres du contrôleur aérien. Obnubilé par la résolution du conflit (tourner droite ou bien tourner gauche), l'équipage omet de surveiller son paramètre altitude et percute le sol. Dans la figure 4.1, nous représentons les trois agents (le pilote, le contrôleur et le FMS) et les connaissances en jeu :

Détecter les ensembles d'AP qui ne sont pas cohérents

La première étape dans la détection de conflit consiste, conformément à la définition 4.2, à déterminer qu'un objectif de la mission (ou AP_but) ne peut être atteint. Déterminer qu'un objectif de la mission ne peut être atteint consiste à montrer qu'il existe des incohérences qui ont une importance entre l'activité réelle (AP_observation) et l'activité prescrite (AP_plan).

DÉF. PRÉLIMINAIRE 4.4 (Ensemble d'attitudes propositionnelles incohérent)

On dira qu'un ensemble d'attitudes propositionnelles est incohérent s'il existe au moins deux AP (A, K, T) et (A', K', T') telles que $T \cap T' \neq \emptyset$ et les propriétés de $K \cup K'$ ne peuvent pas être satisfaites.

Remarque : à chaque type de propriété (altitude, cap ..) on associe un opérateur de comparaison qui statue sur l'égalité de deux valeurs pour une

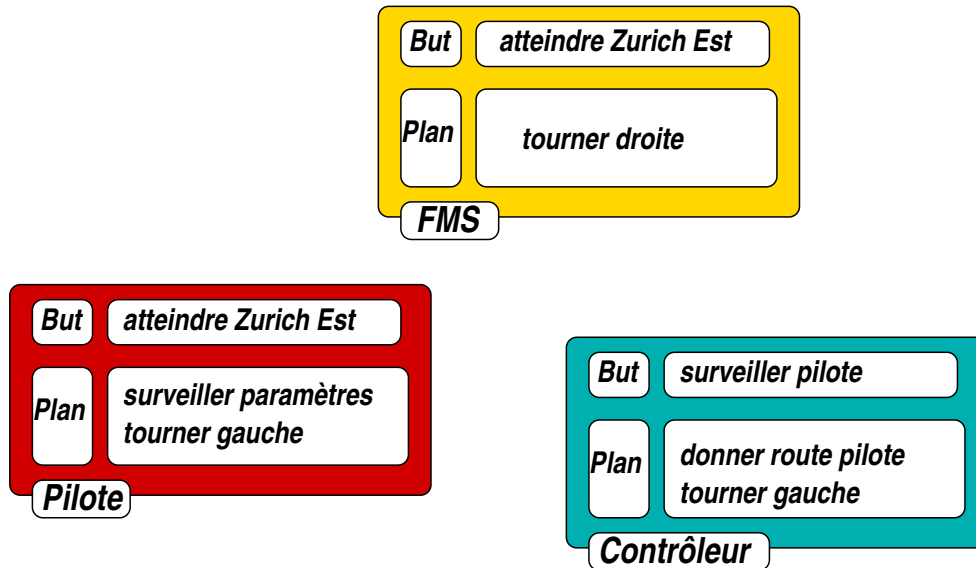


FIG. 4.1: Conflit : représentation des agents et de leurs AP lors de l'accident de la Crossair

même propriété. Les caractéristiques de ces opérateurs varient selon le domaine par exemple : on pourra estimer que 10 000 mètres et 10 010 mètres sont “ égaux ” mais qu’à plus basse altitude le même écart d’altitude ne peut avoir le même statut d’égalité. Ce sont ces opérateurs qui permettent d’établir l’incohérence entre les propriétés de AP_observation et les propriétés des AP du modèle de référence.

Soit \mathcal{AP}_t , l’ensemble total des AP au temps t (qui est de cardinal fini). Étant donné le formalisme utilisé pour représenter la connaissance et les lois de la physique, on peut identifier dans \mathcal{AP}_t les ensembles d’AP incohérents. Conformément à la définition préliminaire 4.4, un ensemble d’AP (AP_but, AP_plan...) est soit cohérent, soit incohérent et il est donc possible de déterminer les ensembles incohérents minimaux [de Kleer et Williams, 1987] au sein de \mathcal{AP}_t , l’ensemble total des AP au temps t .

DÉF. 4.6 (Ensemble minimal d’AP incohérent) *Un ensemble minimal d’AP incohérent, Inc_t , est tel qu’il reste incohérent si on lui rajoute une autre AP et que tout sous-ensemble strict de cet ensemble est cohérent.*

Dans l’accident de la Crossair (c.f. figure 4.2), au temps t l’activité de référence du pilote (tourner à gauche pour aller à Zurich Est) est contradictoire avec l’activité réelle du pilote (tourner à droite pour aller à Zurich Est). Cet ensemble de connaissances appartient à l’ensemble Inc_t :

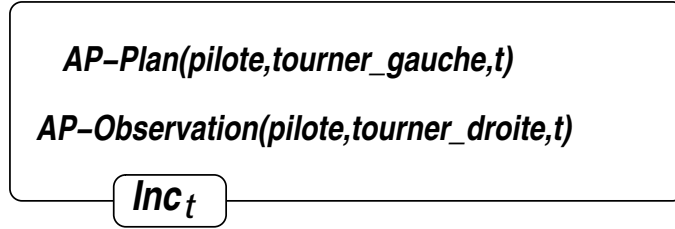


FIG. 4.2: Incohérence dans l'ensemble de connaissances du pilote dans le conflit de la Crossair

Identifier les conflits

On s'intéresse ensuite aux AP cruciales au temps t . Soit Inc_t un ensemble minimal incohérent d'AP au temps t . Si Inc_t contient des AP dont les propriétés sont communes avec une ou plusieurs AP cruciales au temps t , alors Inc_t est un conflit. Cela nous permet de différencier les conflits des simples incohérences.

DÉF. 4.7 (Ensemble d'AP conflictuel) Soit \mathcal{AC}_t , l'ensemble des AP cruciales qui doivent être vérifiées au temps t . $Confl_t$ est un ensemble minimal conflictuel d'AP au temps t si et seulement si :

- $Confl_t$ est un ensemble minimal d'AP incohérent ;
- $(\exists(A, K, t) \in Confl_t)(\exists(A_c, K_c, t) \in \mathcal{AC}_t)$ tel que $K \cap K_c \neq \emptyset$.⁵

L'incohérence dans lequel se trouve le pilote est lourde de conséquence, car la violation de la procédure d'approche de Zurich Est amène l'équipage dans une zone où il peut rencontrer du trafic et risquer une collision. L'ensemble de connaissances Inc_t est conflictuel (c.f. figure 4.3 car il existe une AP cruciale qui appartient à \mathcal{AP}_t et dont une des propriétés est commune avec une des AP de Inc_t :

Identification du conflit

Soit $Confl_t$ un ensemble conflictuel au temps t . Résoudre le conflit consiste à recouvrer localement une cohérence en retirant de l'ensemble total \mathcal{AP}_t une ou plusieurs AP. Chaque sous-ensemble d'AP I_t qui est candidat pour être enlevé de $Confl_t$ est une identification du conflit, c'est-à-dire une des raisons pour laquelle il y a conflit. Ceci peut être comparé à l'approche de De Kleer et Williams [de Kleer et Williams, 1987] en diagnostic. $Confl_t - I_t$ est une situation

⁵Nous faisons ici une utilisation quelque peu abusive de l'intersection ensembliste \cap en considérant les AP comme des ensembles de propriétés.

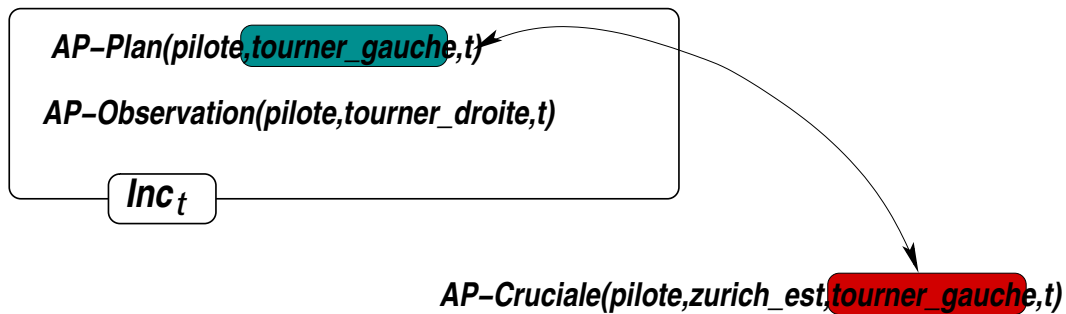


FIG. 4.3: Détection du conflit à l'origine de l'accident

dégradée dans la mesure où des AP initiales ont été abandonnées. Ce point de vue est partagé par Easterbrook [Easterbrook, 1991] : un conflit est *a posteriori* caractérisé par une perte (locale ou globale) pour le ou les agent(s) lors de sa résolution. Cette dernière étape permet d'exprimer le conflit ressenti par les agents, en exprimant les choix (*les situations dégradées*) qu'ils vont devoir faire pour sortir de leur impasse et qui vont guider leur stratégie de résolution.

Dans l'accident de la Crossair, le pilote se trouve pris d'un point de vue psychologique dans un dilemme (aller à droite comme le propose le FMS ou aller à gauche conformément aux procédures et aux ordres du contrôle), pourtant dans ce cas, la seule possibilité de résolution consiste à suivre la procédure.

4.4 Conclusion

L'apparition de conflits dans les interactions humaines et en particulier lorsqu'ils se produisent dans des activités à risque représente un réel facteur de remise en cause de la sécurité. Le conflit est un précurseur remarquable d'accidents, ce qui veut dire qu'il peut aussi servir d'indicateur de la dégradation de l'activité humaine mais aussi que sa détection peut empêcher justement que la situation ne dégénère, à condition toutefois de disposer d'outils théoriques et pratiques pour l'analyser.

Tout au long de ce chapitre nous nous sommes efforcé de mettre en place de tels outils pour nous doter de moyens de définir et de représenter les conflits entre agents. Le point de vue défendu est que les conflits se produisent lorsqu'un individu ou un groupe d'individus sont engagés dans un but important qui ne peut être satisfait.

Plus formellement, la modélisation du conflit repose sur l'étude de l'incohérence au sein de la connaissance portée par des agents, l'idée consistant

à montrer que pendant une période de temps donnée il existe des connaissances qui ne peuvent être satisfaites simultanément. Pourtant, l'incohérence d'un ensemble de connaissances ne représente qu'un conflit larvé ou potentiel. C'est seulement si une incohérence entraîne des conséquences cruciales pour les agents que la situation va devenir conflictuelle.

L'objet de cette modélisation est d'être capable de représenter finement un conflit de manière à connaître les agents impliqués, les connaissances en jeu et les possibilités de résolution.

Chapitre 5

Première validation expérimentale du modèle des conflits

5.1 Introduction

L'objectif est ici de mettre en œuvre le modèle des conflits en l'éprouvant dans une situation expérimentale de pilotage d'avion. Ce que l'on recherche à travers cette mise à l'épreuve est avant tout de prouver le bien-fondé de nos hypothèses sur le conflit en mettant des pilotes dans un simulateur de vol et en analysant leur activité.

Pour pouvoir mener cette expérimentation, on se place dans le cadre du suivi de situation pour détecter l'apparition de conflit conformément aux idées développées au chapitre précédent. L'analyse de l'activité des pilotes et la détection de conflit est un processus qui se réalise ici *a posteriori* à partir des paramètres de vol récupérés lors de chaque simulation : l'idée n'est pas encore de mettre en place un outil capable d'analyser en-ligne l'activité du pilote mais plutôt de proposer une méthode pour analyser l'activité humaine et d'en tester les hypothèses en laboratoire. Cela ne gêne en rien la démarche, au contraire : après chaque vol en simulateur, les pilotes sont interrogés lors d'un debriefing pour commenter leur vol, afin d'exprimer notamment s'ils se sont sentis en conflit ou non ; leurs verbalisations sont confrontées à l'analyse automatique de leur activité.

Dans ce chapitre, nous présenterons successivement l'environnement de simulation qui nous a permis de faire les expérimentations, les situations expérimentales (scénario de vol), la mise en œuvre pratique de l'analyse de l'activité de pilotage et enfin les résultats de nos expérimentations.

5.2 Expérimentations

5.2.1 Avant propos

Dans ce chapitre nous cherchons à mettre en place une méthode d'analyse de l'activité de pilotage par une approche empirique basée sur l'étude des paramètres de vol.

L'idée n'est pas de réaliser une campagne d'expérimentation avec un nombre significatif de pilotes experts volant sur des scénarios réalistes dans un simulateur proche de la réalité.

Dans une démarche de mise au point et de validation de nos hypothèses, nous cherchons plutôt à disposer d'un environnement de simulation :

- configurable et pouvant être adapté aisément aux exigences des expérimentations ;
- réaliste en terme de pilotage ;
- de prise en main rapide pour les pilotes.

Pour ces premières expérimentations, nous avons défini des scénarios relativement simples mais qui relèvent cependant d'une tâche de raisonnement proche du pilotage incluant la surveillance de paramètres (suivi de cap, tenue d'altitude...)

La raison principale est de construire des situations que l'on peut aisément modéliser de manière à éprouver nos hypothèses sur le conflit et sur la représentation symbolique de l'activité de pilotage à travers 4 catégories d'attitudes propositionnelles (AP_but, AP_plan, AP_cruciale, AP_observation).

5.2.2 Environnement expérimental

Les expérimentations sont réalisées dans le Laboratoire d'Interactions Pilote Système (LIPS) situé au centre de Salon de Provence. C'est un environnement de simulation configurable qui donne la possibilité de modifier l'interface, de programmer des scénarios de vol et de choisir parmi plusieurs modèles d'avions réels (Rafale, Alphajet, Transal). De même, les paramètres de vols sont enregistrables.

Lips est constitué d'une cabine de pilotage sommaire et d'un écran sur lequel est projetée la visualisation (horizon, paysage...) La vision tête haute (V.T.H.) se superpose sur l'écran et offre aux pilotes un certain nombre de paramètres pour assurer la navigation : vitesse, altitude, cap, consommation carburant, distance jusqu'au prochain point tournant... Les pilotes, une fois assis dans la cabine, disposent d'un palonnier, d'un manche à balai, d'une manette

des gaz, d'un certain nombre de boutons poussoirs configurables, et d'une interface en Vision Tête Basse (V.T.B.) dans le cockpit où est portée la carte de navigation.



FIG. 5.1: *Environnement Lips : cabine de pilotage et V.T.H.*

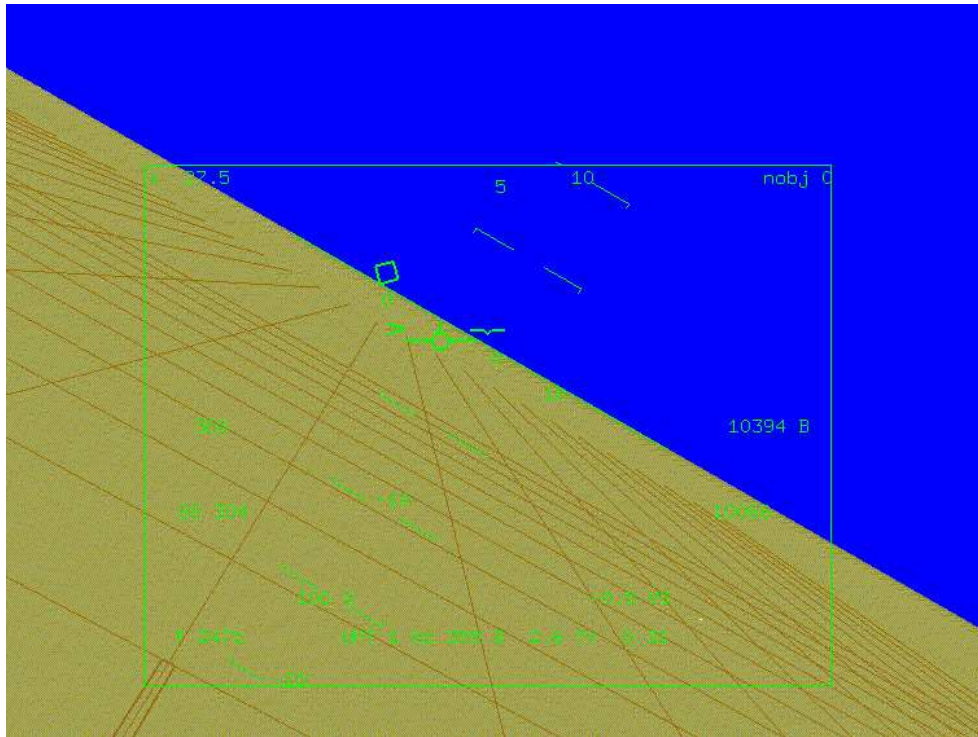


FIG. 5.2: Environnement Lips : détail de la V.T.H.

5.2.3 Généralités sur les scénarios

Les simulations sont fondées sur des scénarios de suivi de plan de vol dont la difficulté principale réside dans la gestion adaptée du carburant. Les pilotes ne sont pas placés dans des situations conflictuelles *a priori* : durant les simulations il n’y a ni panne, ni dégradation de la météorologie. De plus, les scénarios sont suffisamment simples du point de vue du pilotage pour que des pilotes qui ne sont pas experts puissent participer à ces expérimentations :

- le modèle retenu est celui d’un avion de transport lourd, stable et facile à piloter ;
- au début de chaque scénario, les pilotes sont directement placés en amont du premier point tournant à 3000 pieds, l’atterrissage consiste simplement à piquer sur le terrain ;
- la navigation se fait en se conformant au guidage donné par un curseur (affiché en V.T.H.), la sélection d’un point de navigation se fait par pression sur un bouton situé sur le manche ;
- le ravitaillement consiste à passer à la verticale d’un point “ravitaillement” qui incrémente le niveau de carburant de 2 tonnes.

5.2.4 Scénario d'entraînement

L'objectif du scénario d'entraînement est de familiariser les pilotes avec le simulateur, afin qu'ils testent la sensibilité des commandes, qu'ils comprennent le principe de la sélection des points de navigation, et qu'ils s'habituent à interpréter les informations sur la V.T.H. Enfin ce scénario permet de familiariser les pilotes à la gestion de leur consommation de carburant, et au ravitaillement en passant sur les zones prévues à cet effet.

La mission consiste à passer respectivement à une altitude constante de 3000 pieds sur les points de navigation 1, 2, 3 et 4 puis achever le vol en se ravitaillant sur le point tournant 5 (c.f. figure 5.3).

Les pilotes jouent ce scénario jusqu'à ce qu'ils se sentent en confiance puis sont lâchés sur la seconde mission " Ravitaillement " (c.f. figure 5.8), objet de notre expérimentation.

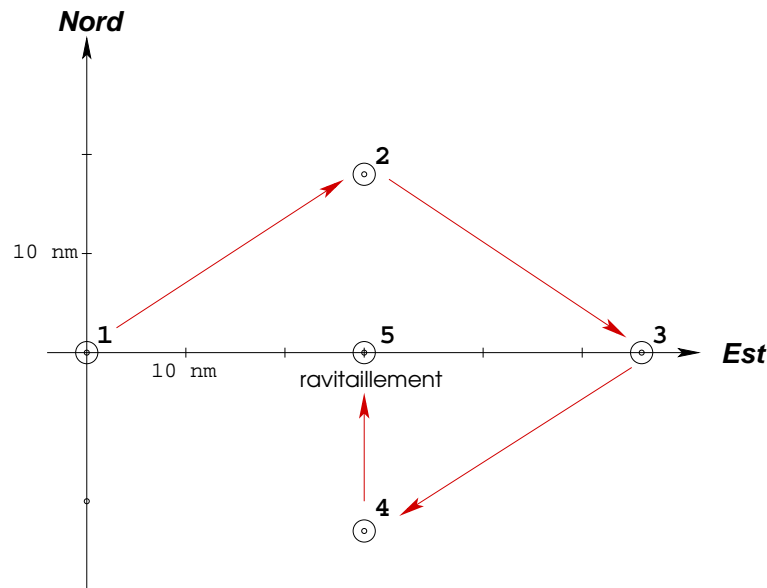


FIG. 5.3: Scénario d'entraînement

5.2.5 Scénario expérimental : la mission Ravitaillement

Il s'agit du scénario principal, objet de nos expérimentations. Le pilote doit suivre le plan de vol suivant : passer, dans l'ordre, par les points de navigation 1, 2, 3, 4, 5, 7 et 8 puis atterrir en 1. Comme la quantité de carburant initiale (2 tonnes) n'est pas suffisante pour réussir la mission, les pilotes peuvent se dérouter pour aller se ravitailler en passant à la verticale des points 6 et 9.

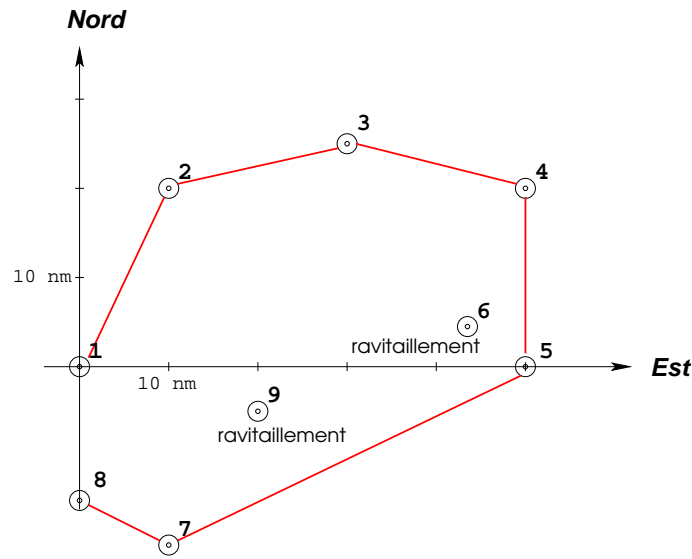


FIG. 5.4: Scénario de la mission Ravitaillement

5.2.6 Déroulement des expérimentations

Dix pilotes (une femme, neuf hommes) ont participé aux expérimentations, ils possèdent tous une expérience significative du pilotage : la plupart sont pilotes de planeur brevetés, deux sont instructeurs en aviation générale (500 heures de vol) et enfin l'un est pilote de transport dans l'armée de l'air (3500 heures de vol). Tous les pilotes, excepté l'officier des Forces, sont chercheurs à l'Onera.

Pilote	Age	Heures de Vol	Latéralité	Profession
Pilote1	26	300	Droitier	Doctorant
Pilote2	25	100	Gaucher	Doctorant
Pilote3	38	500	Droitier	Ingénieur de recherche
Pilote4	37	500	Droitier	Ingénieur de recherche
Pilote5	24	20	Droitière	Doctorant
Pilote6	25	100	Droitier	Doctorant
Pilote7	26	300	Droitier	Doctorant
Pilote8	24	10	Droitier	Doctorant
Pilote9	25	50	Droitier	Doctorant
Pilote10	35	3500	Droitier	Pilote de l'Armée de l'Air

Accueil des pilotes

Les sujets sont accueillis individuellement par l'expérimentateur qui leur explique que le but des expérimentations est de mettre au point un outil de suivi de situation pour analyser l'activité de pilotage. Ensuite, l'expérimentateur pose des questions relatives à l'âge, la latéralité, l'expérience de vol et la profession des sujets.

Entraînement

Le sujet s'installe dans la cabine de pilotage (c.f. figure 5.5) et l'expérimentateur l'instruit du fonctionnement des commandes de vol. Le pilote peut ensuite faire son apprentissage du simulateur avec le scénario d'entraînement pendant le temps souhaité.

Présentation du scénario " Ravitaillement " et vol

Une fois que le pilote se sent confiant avec le simulateur, l'expérimentateur dévoile le scénario principal. Le sujet dispose du temps nécessaire pour préparer sa navigation et est libre de poser toutes questions. Ensuite, l'expérimentateur demande au sujet de répéter les différents objectifs du scénario, et enfin, une fois qu'il est prêt et à son signal, la mission peut commencer.

Debriefing

Après chaque simulation, l'expérimentateur conduit un entretien autour du vol que le sujet vient d'effectuer en l'interrogeant sur son ressenti pour déterminer si celui-ci a fait face à des situations conflictuelles.

5.3 Analyse de l'activité de pilotage

L'idée étant de comprendre les décisions du pilote face aux contraintes de vol et d'identifier les conflits, l'objet ici est d'analyser les paramètres de vol pour remonter, en partie, à l'activité cognitive du pilote. De ce fait, nous avons développé un premier logiciel (codé en MATLAB) qui reçoit en entrée les paramètres de vol numériques et fournit en sortie une activité symbolique pour chaque pilote. Sans forcément adopter le point de vue des cognitivistes [Varela, 1996] sur le traitement de l'information, le souci de travailler au niveau symbolique est essentiellement animé par la volonté de représenter de manière

extrêmement lisible l'activité de pilotage de façon à comprendre la connaissance manipulée par les pilotes. Ce logiciel permet également de représenter graphiquement, en fonction du temps, certains paramètres pertinents tels que la trajectoire suivie, l'altitude, la consommation de carburant... Ensuite, c'est grâce à la traduction symbolique que l'on peut appliquer notre algorithme de détection de conflit (implémenté en PROLOG III). Cette méthode est résumée dans la figure 5.5 :

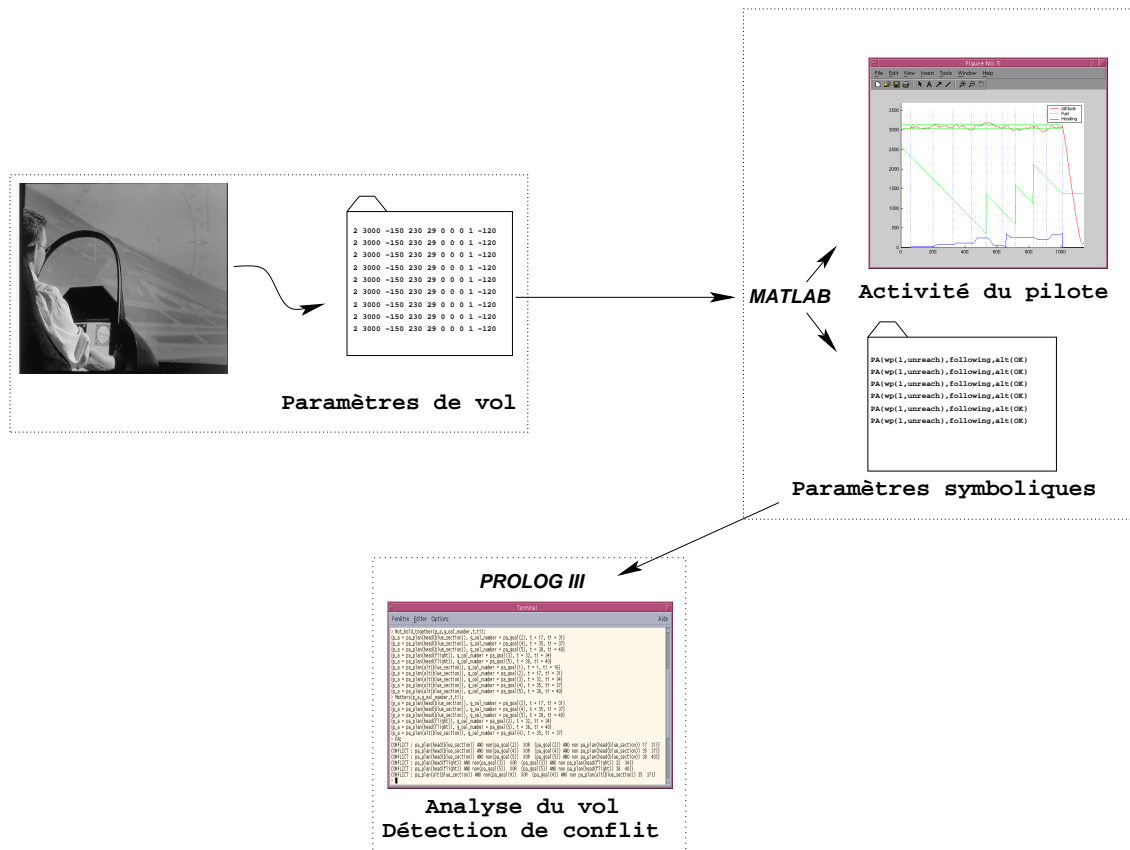


FIG. 5.5: Méthode d'analyse de l'activité de pilotage et de détection de conflit

5.3.1 Le modèle de référence

La notation utilisée ici et dans la suite pour les AP diffère de celle la définition 4.1 (triplet : agent, contenu, intervalle de temps). Nous omettons l'agent car nous ne nous intéressons qu'à un seul pilote et nous ajoutons un identifiant à chaque AP. Le contenu est représenté par un cube [Chaudron et Maille, 1999], c'est-à-dire une conjonction de propriétés à vérifier pendant un

intervalle de temps. L'identifiant est utilisé à des fins d'implémentation pour permettre de faire référence à une AP.

En premier lieu, on s'attache à représenter l'activité de référence au vu du plan de vol :

AP_but : chaque AP_but décrit un des neufs points tournant de la mission. Cette AP est mise en oeuvre dans le modèle par le prédicat `pa_goal` :
`pa_goal(goal(1), <waypoint(1)>, T)`

Ceci se traduit par : *le premier but de la mission est d'atteindre le point tournant 1 durant l'intervalle de temps T.*

AP_plan : chaque AP_plan décrit la méthode à suivre pour atteindre un AP_but du scénario. Elle est mise en oeuvre par le prédicat `pa_plan` :
`pa_plan(goal(1), <heading(230), altitude(3000), fuel(OK), refuel(OK)>, T)`

Ceci se traduit par : *pour satisfaire son but 1, le pilote suit le cap 230, à l'altitude de 3000 pieds, a suffisamment de carburant pour l'atteindre et dispose d'assez de carburant pour rejoindre le point de ravitaillement le plus proche durant l'intervalle de temps T.*

AP_cruciale : cette AP_cruciale exprime les contraintes particulières pour la mission " Ravitaillement ". Elle est mise en oeuvre par le prédicat `pa_crucial` :
`pa_crucial(goal(x), <refuel(reachable)>, T)`

Ceci se traduit par : *Quel que soit le but dans lequel s'engage le pilote, il doit toujours disposer d'assez de carburant pour avoir la possibilité d'aller se ravitailler durant l'intervalle de temps T. T s'instancie avec l'intervalle de temps du but goal(x).*

5.3.2 Modélisation de l'activité observée de pilotage

Pour représenter l'activité du pilote, nous nous concentrons sur 6 paramètres de vol : le temps, l'altitude, le cap, le point de navigation sélectionné, la position de l'avion, la consommation de carburant. Ces données sont suffisantes pour reconnaître les phases de vol et déduire si le but sélectionné par le pilote peut être atteint ou non.

Altitude

Durant la mission, il est spécifié de maintenir une altitude de 3000 pieds, cependant il est difficile pour un pilote de conserver précisément cette altitude

tout en continuant de surveiller les autres paramètres (cap, consommation..) et en prenant des décisions concernant le vol. En fait, chaque pilote se définit une enveloppe de vol dans laquelle il se sent en sécurité [Amalberti, 1996]. Ainsi les pilotes se laissent une marge de manœuvre plus grande, et peuvent libérer leur attention pour surveiller d'autres paramètres. Les limites inférieures et supérieures de cette enveloppe sont établies avec les pilotes. Toute déviation en dehors de ces limites est considérée comme une erreur de pilotage (c.f. figure 5.6).

Après traduction numérique/symbolique, le paramètre altitude est caractérisé comme *altitude(bad)* (c'est-à-dire que l'altitude se situe hors de l'enveloppe de vol) ou alors comme *altitude(good)* (c'est-à-dire une altitude correcte).

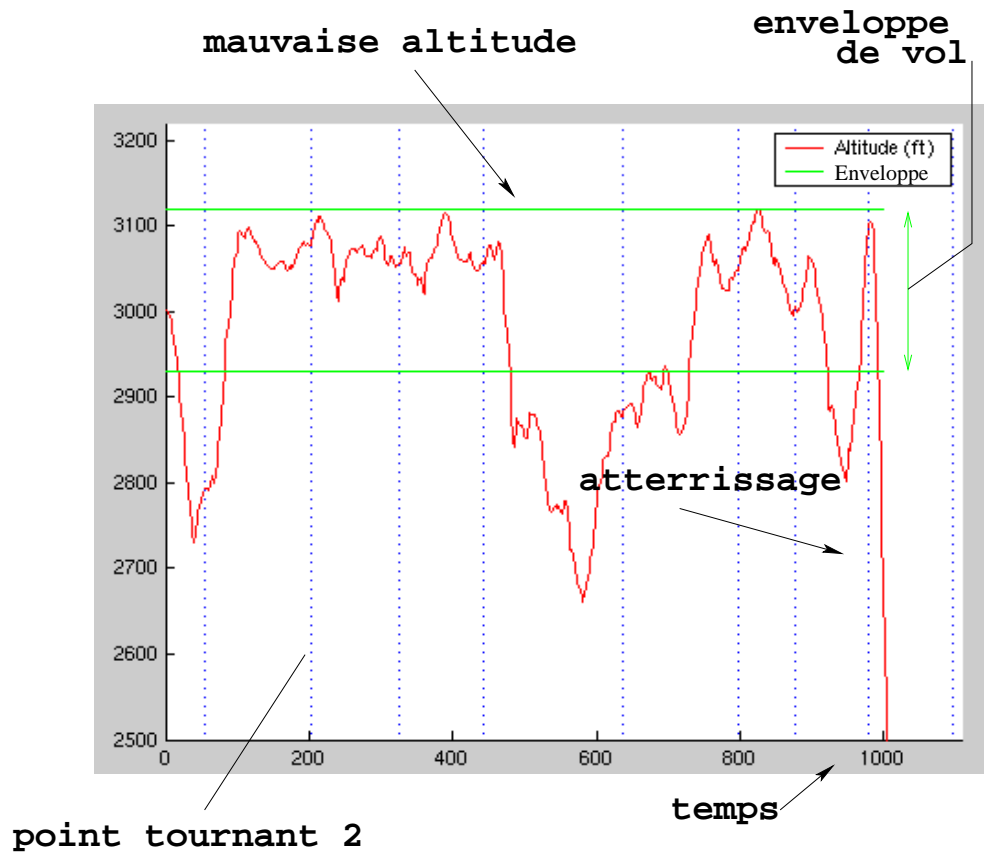


FIG. 5.6: Représentation de l'altitude en pieds, en fonction du temps : l'enveloppe de vol est matérialisée par les deux droites horizontales. Les droites verticales en pointillé représentent les passages sur les points tournants : par exemple au temps $t = 200$, le pilote est passé sur le point tournant 2.

Cap

Ce paramètre est utilisé pour vérifier la cohérence de la route du pilote avec le plan de vol initial mais permet également d'identifier certains motifs de vol comme la mise en virage ou l'interception de vecteur (c.f. figure 5.7).

La traduction symbolique pour la trajectoire du pilote est soit *drifting* (le pilote dévie de sa route), soit *intercepting* (le pilote intercepte le bon vecteur pour rejoindre le point tournant), soit *turning* (le pilote effectue une mise en virage pour intercepter le prochain vecteur).

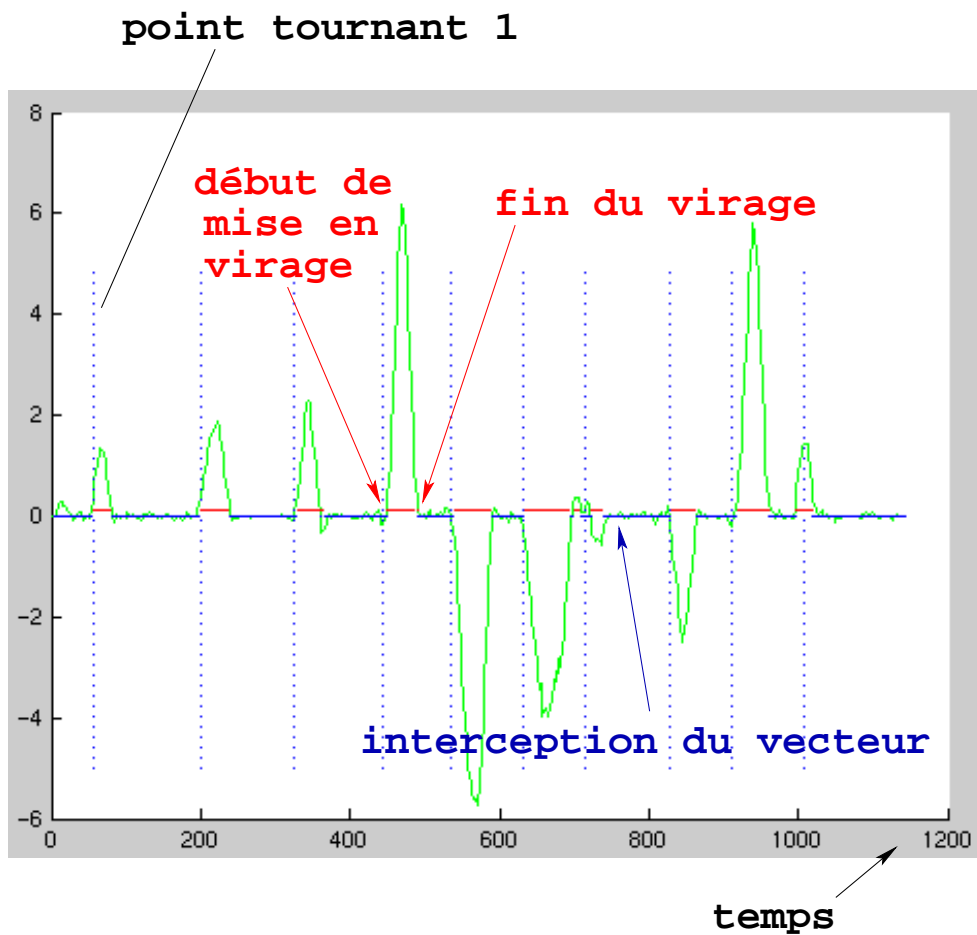


FIG. 5.7: Représentation de la trajectoire du pilote obtenue par la dérivée du cap. Après chaque passage sur un point tournant (droites verticales en pointillé), le pilote fait sa mise en virage pour se diriger vers le point de navigation suivant. Lorsque la pente de la courbe est nulle, alors le pilote est sur la bonne trajectoire (interception du vecteur) pour atteindre son prochain but.

Point tournant sélectionné, position de l'avion

C'est à partir de ces paramètres que l'on détermine le point tournant courant du pilote et son état (atteint, non atteint) en mettant en correspondance les coordonnées géographiques du point tournant sélectionné avec la position de l'avion.

La traduction symbolique de ces paramètres est soit `waypoint(x,reached)` (*le pilote a atteint le point tournant x*), soit `waypoint(x,unreached)` (*le pilote a sélectionné le point tournant x mais il ne l'a toujours pas atteint*).

Carburant et position de l'avion

Ces paramètres sont analysés à chaque pas de temps de simulation afin de déterminer si le pilote est capable d'atteindre son but courant, les zones de ravitaillement et ses buts futurs :

- `fuel(OK)` et `fuel(non(OK))` expriment respectivement que le pilote a assez de carburant ou non pour atteindre son but courant ;
- `refuel(reachable)` et `refuel(unreachable)` traduisent la capacité ou non de pouvoir rejoindre le point de ravitaillement le plus proche ;
- `waypoint(3, reachable)` et `waypoint(5, unreachable)` indiquent respectivement que le pilote dispose d'assez de carburant ou non pour atteindre les points tournants futurs. Dans cet exemple les points tournants futurs du pilote sont les points 3 et 5 : le pilote peut rejoindre le point 3 mais pour aller au point 5, il lui faudra préalablement se ravitailler.

AP_observation

C'est en agrégeant l'ensemble de ces connaissances que l'on obtient pour chaque pas de temps une `AP_observation`, constituée d'un cube (c'est-à-dire d'une conjonction de propriétés qui représentent l'état de l'activité du pilote) et d'un intervalle de temps. Nous avons constitué les `AP_observation` de manière à représenter les connaissances essentielles manipulées par les pilotes pour réussir les scénarios expérimentaux (surveillance de l'altitude et du cap, gestion et anticipation de la quantité de carburant) :

```
pa_obs(<waypoint(1,unreached),waypoint(2,reachable),refuel(reachable),
intercepting,fuel(OK),alt(BAD)>,44)
```

qui se traduit par : *au temps 44, le pilote n'a toujours pas atteint le point tournant 1, il a assez de carburant pour atteindre le point tournant 2 suivant et il a assez de carburant pour se rendre à un point de ravitaillement, son cap est correct (intercepting), il a assez de carburant (fuel(OK)) pour rejoindre le point 1 mais son altitude n'est pas correcte (alt(BAD)).*

```

AD)>, 32)->;
PA_obs(<waypoint (1, unreached), nextwaypoint (2, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 34)->;
PA_obs(<waypoint (1, unreached), nextwaypoint (2, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 36)->;
PA_obs(<waypoint (1, unreached), nextwaypoint (2, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 38)->;
PA_obs(<waypoint (1, unreached), nextwaypoint (2, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 40)->;
PA_obs(<waypoint (1, unreached), nextwaypoint (2, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 42)->;
PA_obs(<waypoint (1, unreached), nextwaypoint (2, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 44)->;
PA_obs(<waypoint (1, unreached), nextwaypoint (2, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 46)->;
PA_obs(<waypoint (1, reached), nextwaypoint (2, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 48)->;
PA_obs(<waypoint (2, unreached), nextwaypoint (3, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 50)->;
PA_obs(<waypoint (2, unreached), nextwaypoint (3, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 52)->;
PA_obs(<waypoint (2, unreached), nextwaypoint (3, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 54)->;
PA_obs(<waypoint (2, unreached), nextwaypoint (3, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 56)->;
PA_obs(<waypoint (2, unreached), nextwaypoint (3, reachable), refuel(9, reachable), turning, fuel(OK), alt (BAD)>, 58)->;
PA_obs(<waypoint (2, unreached), nextwaypoint (3, reachable), refuel(9, reachable), intercepting, fuel(OK), alt (BAD)>, 60)->;

```

XEmacs: frankM.txt (Text PenDel Fill)---- 3%

FIG. 5.8: *Activité observée du Pilote10 : l'activité du pilote est représentée à travers les AP_observation. On note, par exemple, qu'au temps 48 le Pilote10 atteint le point tournant numéro 1, il dispose d'assez de carburant pour atteindre le prochain point tournant (numéro 2) et pour aller se ravitailler (numéro 9), il effectue un virage, son altitude est mauvaise, sa quantité de carburant est cohérente avec sa navigation.*

5.4 Résultats

Lors des expérimentations, nous avons identifié automatiquement que deux pilotes (Pilote3 et Pilote4) ont eu une gestion conflictuelle de leur vol. Ces conflits ont été confirmés par les pilotes lors du debriefing. Les huit autres pilotes ont réalisé avec succès la mission " Ravitaillement " et ont déclaré ne pas avoir fait face à un conflit durant leur vol. Nous proposons ici de détailler la détection des deux conflits identifiés durant les expérimentations.

Comme nous l'avons précisé dans la section 4.3, la détection de conflits est un processus qui observe les AP du pilote à chaque pas de temps t et qui se déroule en trois étapes : tout d'abord on détermine les ensembles minimaux

d'AP qui ne sont pas cohérents au temps t , ensuite on sélectionne les conflits étant donné les AP cruciales concernées au temps t , pour identifier le conflit. L'idée de découper en deux étapes la détection du conflit (ensemble d'AP incohérents, ensemble d'AP conflictuels) est motivée par trois considérations :

- en retour d'expérience [Chaudron *et al.*, 2000d] il est intéressant de mettre en valeur l'ensemble des incohérences (même si elles n'ont pas conduit au conflit) afin de comprendre comment les équipages les ont gérées durant le vol ;
- certaines incohérences ne sont pas conflictuelles dans une phase de vol, mais peuvent le devenir dans des phases ultérieures, et il est donc capital de les détecter le plus tôt possible afin de prédire que la situation va peut-être devenir conflictuelle ;
- certaines incohérences ne seront pas traitées comme des conflits par notre algorithme, tout simplement parce que notre modèle est incomplet en ce qui concerne les AP_cruciales. Pour résoudre cette question, une méthode pourra consister à interroger les pilotes pour comprendre pourquoi une incohérence est devenue conflictuelle sans qu'on l'ait détectée. Cela permettra d'enrichir notre modèle en intégrant de nouvelles AP_cruciales.

5.4.1 Conflit 1 : conflit de représentation sur le point 5

Dans cette expérimentation, le Pilote3, après être passé sur les points tournants 1, 2, 3 et 4, se dirige directement vers le point tournant 5. Or étant donné sa quantité de carburant restante, il doit au préalable aller se ravitailler en 6 s'il veut pouvoir continuer la mission. Pourtant le pilote s'obstine à atteindre le point 5, passe dessus, puis refait un circuit pour s'y rediriger et tombe à court de carburant (c.f. figure 5.9).

Durant le debriefing, le pilote nous a expliqué qu'il était convaincu que le point tournant 5 était la zone de ravitaillement (en dépit de la carte dont il disposait en vision tête basse dans le cockpit) ; alors qu'il l'atteint, il se rend compte que sa quantité de fuel n'a pas augmenté. Pensant l'avoir manqué, il décide de retourner vers le point tournant 5. Il répète cette manoeuvre, devenant de plus en plus stressé, jusqu'à ce qu'il n'ait plus de carburant.

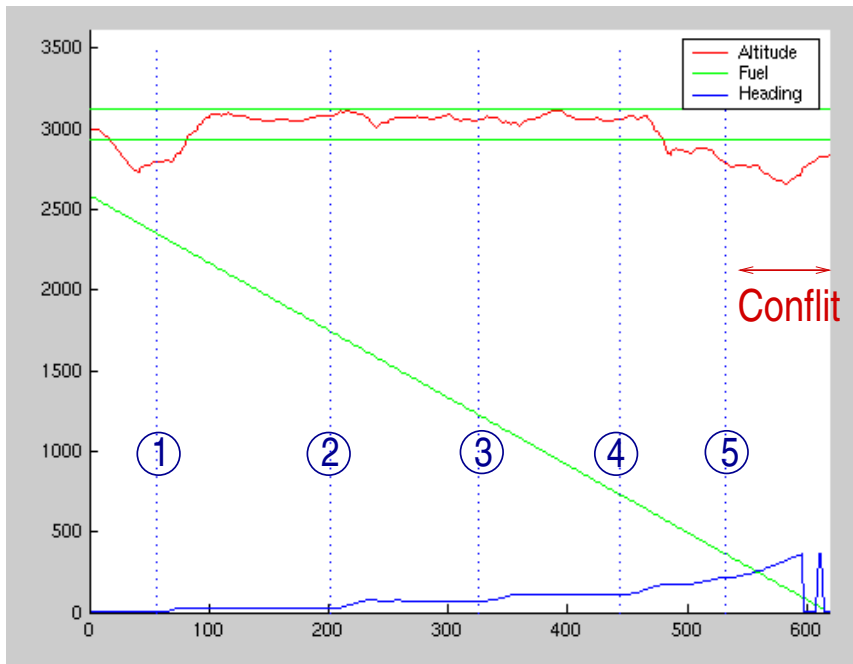
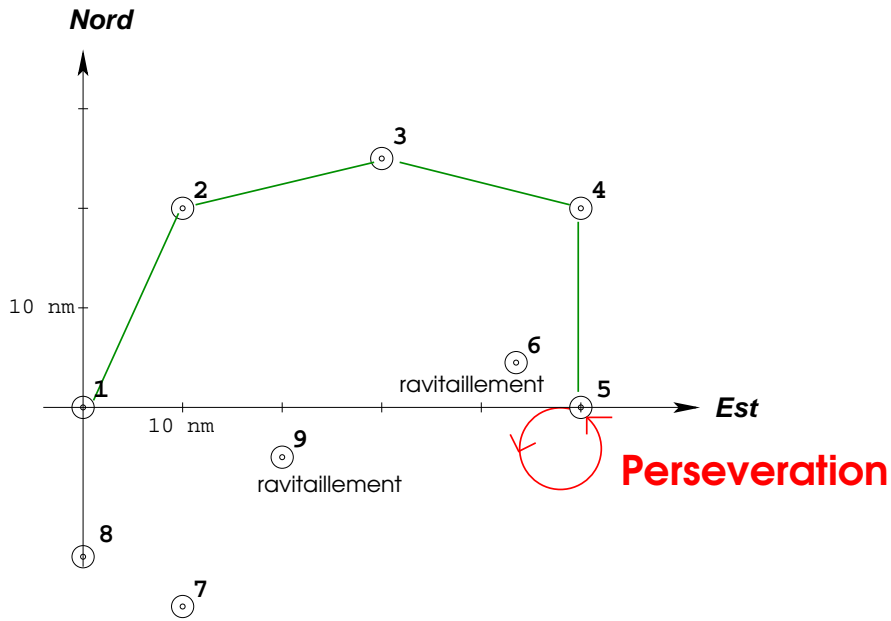


FIG. 5.9: Représentation graphique du conflit : la figure du haut matérialise la trajectoire du pilote et sa persévération autour du point 5. La figure du bas montre les paramètres de vol du pilote lors de sa navigation.

Modélisation du conflit 1 : détection des ensembles d'AP qui ne sont pas cohérents

Le prédicat `not_hold_together` détecte les ensembles minimaux incohérents d'AP au temps t :

buts du pilote : le pilote s'engage dans le but 5 durant l'intervalle de temps $T1 [448,t1]$ ¹ :

```
pa_goal(goal(5),<waypoint(5)>,<448,t1>)
```

Son but courant est d'atteindre le point tournant 5, mais il doit aussi prendre en compte son ravitaillement s'il veut pouvoir achever sa mission (se rendre en 6, durant l'intervalle de temps $T2 [t2,t3]$) :

```
pa_goal(goal(6),<waypoint(6)>,<t2,t3>)
```

plans du pilote : pour atteindre ses buts, le pilote a les plans suivants :

```
pa_plan(goal(5),<heading(180),altitude(3000),fuel(OK),
refuel(reachable)>,<448,t1>)
```

```
pa_plan(goal(6),<heading(230),altitude(3000),fuel(OK),
refuel(reachable)>,<t2,t3>)
```

observation : au temps 574, l'outil observe que le pilote a assez de carburant pour atteindre le point 5, qu'il n'a pas assez de carburant pour atteindre le point 7, qu'il ne peut plus atteindre une zone de ravitaillement, que son cap est correct mais que son altitude est mauvaise :

```
pa_obs(<waypoint(5,unreached),waypoint(7,unreachable),
refuel(unreachable),intercepting,fuel(OK),alt(BAD)>,574)
```

détection des incohérences : l'outil détecte trois ensembles minimaux d'AP incohérents :

```
(1) not_hold_together(pa_plan(5,altitude(good)),
pa_obs(altitude(bad)),574)
```

```
(2) not_hold_together(pa_plan(6,refuel(reachable)),
pa_obs(refuel(unreachable)),574)
```

¹l'outil a détecté que le pilote s'est engagé au but 5 au temps 448, mais la fin de l'engagement du pilote pour ce but est inconnu.

(1) signifie que l'observation de l'altitude du pilote n'est pas cohérente avec l'AP-plan 5.

(2) signifie qu'il y a une incohérence entre le plan d'aller se ravitailler (aller en 6) et l'observation de l'état courant du pilote (il n'a plus assez de carburant pour atteindre un point de ravitaillement).

Modélisation du conflit 1 : détection de l'ensemble d'AP conflictuel

Les AP_cruciales sont alors considérées au temps t . Le prédicat `matters` analyse les ensembles Inc_t au regard des AP_cruciales, de manière à déterminer s'ils sont ou non conflictuels.

AP_cruciale : dans le scénario il était clairement expliqué aux pilotes que toute erreur dans la gestion du carburant les conduirait à l'abandon de la mission : quel que soit le but dans lequel il est engagé, il doit avoir la possibilité de se ravitailler.

`pa_crucial(goal(x), <refuel(reachable)>, T)`

détection du conflit : le prédicat `matters` détecte qu'un des trois ensembles minimaux incohérents Inc_t est conflictuel :

`matters(pa_plan(goal(6), refuel(reachable)), pa_obs(refuel(unreachable), 574))`

Le pilote est dans une situation conflictuelle avec le but 6 car il n'aura pas assez de carburant pour l'atteindre et est forcé d'abandonner la mission.

5.4.2 Conflit 2 : conflit de représentation sur le point 9

Dans cette expérimentation, le Pilote4, après être passé sur le point tournant 6, se dirige vers le point tournant 7, mais il constate en route qu'il doit se dérouter pour aller se ravitailler en 9 s'il veut pouvoir finir la mission.

Alors que cette zone de ravitaillement pouvait être atteinte en moins de 50 secondes d'après la position courante de l'avion, 258 secondes plus tard le pilote tourne désespérément autour sans pourtant l'atteindre, perdant de plus en plus d'altitude, et tombant finalement à court de carburant (c.f. figure 5.11).

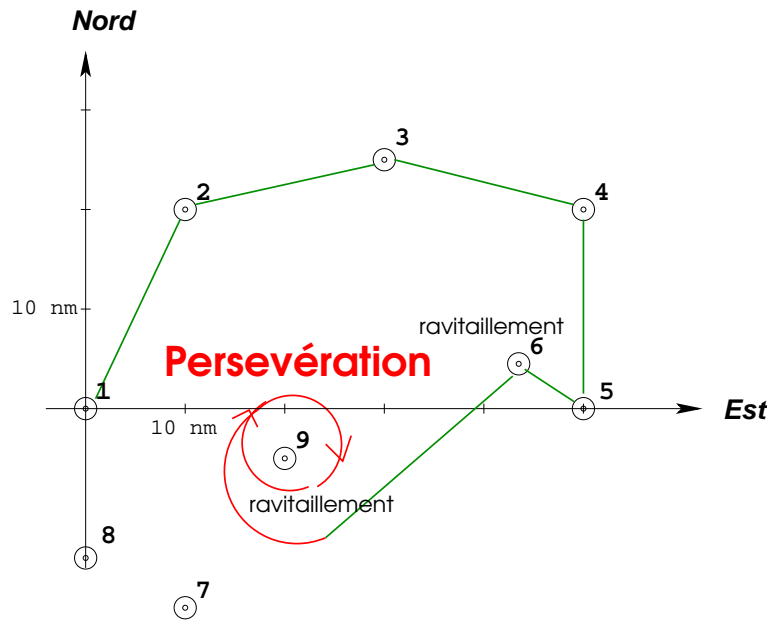
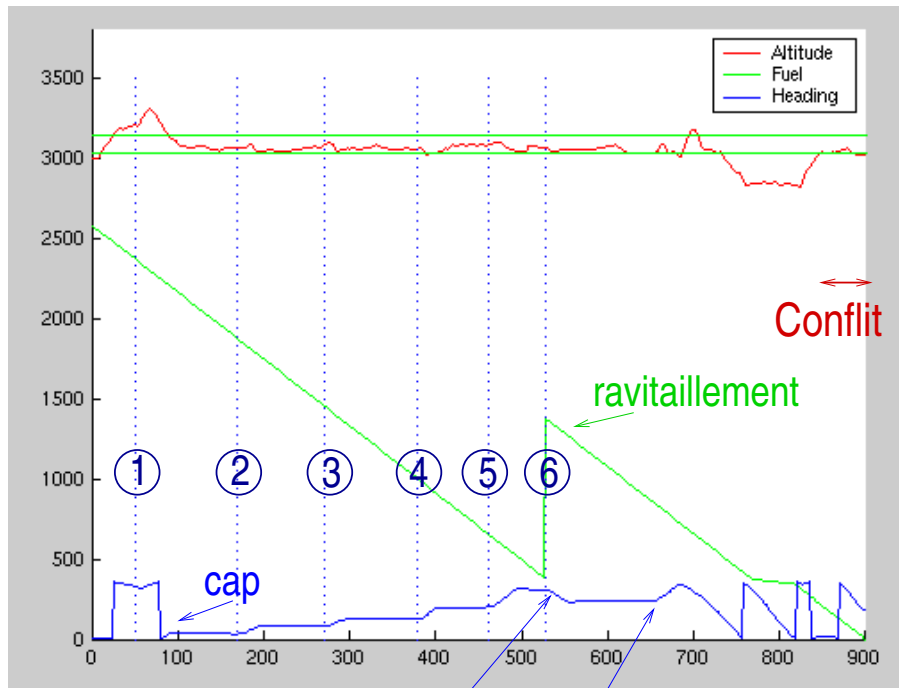


FIG. 5.10: Représentation graphique du conflit 2 : le pilote prend un mauvais cap pour rejoindre le point tournant 9, persévère, et tourne autour du point de ravitaillement sans jamais l'atteindre.

Pendant le debriefing, nous avons demandé au pilote des explications sur son comportement : il nous a expliqué qu'il avait une représentation erronée de sa position qui l'a amené à prendre une mauvaise décision sur son cap. En fait, lorsqu'il a décidé de se dérouter vers le point de ravitaillement 9, il ne s'est pas rendu compte qu'il en était si proche : avec un avion type transport lourd, à grand rayon de virage, il lui était impossible, considérant sa position, de rejoindre le point 9 avec un vecteur direct. Bien qu'il ait noté qu'il ne cessait de tourner autour du point 9, il n'a pas modifié sa trajectoire. Et à mesure que le carburant diminuait, il devenait de plus en plus stressé finissant par tomber dans un cercle vicieux qui l'a conduit à tourner sans cesse. Ici, comme dans le conflit précédent, le pilote disposait de toute l'information disponible sur son interface, dans un intervalle de temps suffisant, pour réorganiser son pilotage et finir la mission sans incident.



prise de cap pour aller en 7
le pilote se dérouté pour aller en 9 (t=660)

FIG. 5.11: Représentation graphique du conflit 2 : le pilote effectue une navigation nominale en allant respectivement sur les points tournant 1, 2, 3, 4, 5 et 6 (ravitaillage). En chemin vers le point tournant 7, il décide de se dérouté vers le point tournant 9 pour se ravitailler au temps 660. Sa mauvaise prise de trajectoire l'amène à tourner autour de ce point sans jamais l'atteindre.

Modélisation du conflit 2 : détection des ensembles d'AP qui ne sont pas cohérents

Le prédicat `not_hold_together` détecte les ensembles minimaux incohérents d'AP au temps t :

buts du pilote : le pilote s'engage dans le but 9 pour se ravitailler durant l'intervalle de temps $T1$ $[660, t1]^2$:
`pa_goal(goal(9), <waypoint(9)>, <660, t1 >)`

²l'outil a détecté que le pilote s'est engagé au but 9 au temps 660, mais la fin de l'engagement du pilote pour ce but est inconnu.

plans du pilote : pour atteindre ses buts, le pilote a les plans suivants :

```
pa_plan(goal(9),<heading(180),altitude(3000),fuel(OK),
refuel(reachable)>,<660,t1>)
```

observation : au temps 868, l'outil observe que le pilote n'a pas assez de carburant pour atteindre le point 9, qu'il a assez de carburant pour atteindre le point 7, que son cap est correct mais que son altitude est mauvaise :

```
pa_obs(<waypoint(9,unreached),waypoint(7,reachable),
refuel(unreachable),intercepting,alt(BAD)>,<868>)
```

détection des incohérences : l'outil détecte trois ensembles minimaux d'AP incohérents :

```
(1) not_hold_together(pa_plan(9,altitude(good)),
pa_obs(altitude(bad)),868)
```

```
(2) not_hold_together(pa_plan(9,refuel(reachable)),
pa_obs(refuel(unreachable)),868)
```

(1) signifie que l'observation de l'altitude du pilote n'est pas cohérente avec l'AP-plan 9.

(2) signifie qu'il y a une incohérence entre le plan d'aller se ravitailler (aller en 9) et l'observation de l'état courant du carburant du pilote.

Modélisation du conflit 2 : détecter de l'ensemble d'AP conflictuel

Les AP_cruciales sont alors considérées au temps t .

AP_cruciale : dans le scénario il était clairement expliqué aux pilotes que toute erreur dans la gestion du carburant les conduirait à l'abandon de la mission : quel que soit le but dans lequel il est engagé, il doit avoir la possibilité de se ravitailler.

```
pa_crucial(goal(x),<refuel(reachable)>,<T>)
```

détection du conflit : le prédicat `matters` détecte qu'un des deux ensembles minimaux incohérents Inc_t est conflictuel :

```
matters(pa_plan(goal(9),refuel(reachable)),pa_obs(refuel(unreachable),868))
```

Le pilote est dans une situation conflictuelle avec le but 9 car il n'aura pas assez de carburant pour l'atteindre et est forcé d'abandonner la mission.

5.5 Discussion

5.5.1 Réflexion sur la persévération : vers une limite du modèle des ressources cognitives

Les théories en psychologie et en ergonomie expliquent l'apparition de la persévération de la manière suivante : on considère l'existence d'un " processeur central " [Baddeley, 1990], grand chef d'orchestre de sous-systèmes cognitifs spécialisés ou d'un " système central exécutif " [Shallice, 1995], gestionnaire de l'organisation de modules spécialisés, subordonné par un " superviseur attentionnel " dont le rôle est d'orienter et de contrôler l'attention. On postule que ces systèmes ont un fonctionnement limite (c.f. 3.2.2) et c'est l'effondrement des ressources cognitives dont ils dépendent qui amène l'opérateur à commettre des erreurs et le conduit à un comportement de persévération.

Pourtant l'examen de nos résultats et la revue de la littérature récente en psychologie cognitive amène à admettre quelques réserves sur ces modèles.

Tout d'abord, dans nos expériences, il ne semble pas que les deux pilotes aient dû faire face à un problème de surcharge cognitive tel que cela les aurait empêchés de baisser la tête et de trouver l'information pertinente dans le cockpit. C'est plus vraisemblablement la peur de tomber en panne qui a fasciné les pilotes et les a conduits à vouloir se rendre sur ce qu'ils croyaient être les zones de ravitaillement.

Ensuite, à ce jour, aucun superviseur attentionnel, aucun système central exécutif, ni aucun processeur central n'a été identifié [Camus, 1996]. Il peut par ailleurs paraître étonnant que le cerveau, qui dispose de plusieurs dizaines de milliards de neurones comptant chacune en moyenne 25 synapses, soit tant contingenté en ressources cognitives. Enfin, le concept des ressources comme son concept associé de charge de travail échappent à l'investigation scientifique puisqu'il n'existe aucun moyen objectif de les mesurer ou de les additionner, les soustraire... La métaphore est pratique, elle repose sur un fond de vérité scientifique, mais les mécanismes sous-jacents semblent plus complexes.

Peut-être doit on admettre comme le suggère Berthoz [Berthoz, 2003] : *" qu'il n'y ait pas de centre superviseur mais un équilibre dynamique constitué de processus du type " le vainqueur rafle la mise " (winner takes all) ou, selon un modèle très à la mode aujourd'hui, des attracteurs. La décision serait alors le résultat d'une compétition non supervisée entre des processus inhibiteurs et des processus excitateurs. "*

Chez les patients cérébrolésés atteints du syndrome de persévération, c'est justement la disparition d'un processus cognitif (inhibiteur ou activateur) lié à une perte de neurones, qui rompt la dynamique des interactions entre réseaux neuronaux et affecte les réponses comportementales. On peut penser que de la même manière, chez des opérateurs, l'apparition du stress perturbe le fonctionnement du cerveau d'une façon telle qu'il modifie les interactions en inhibant certains processus cognitifs au détriment d'autres. Ainsi, tout laisse supposer que la disparition d'un processus par perte de neurones (lésion) ou par inhibition (stress) altère l'homéostasie du cerveau et peut produire des comportements inadaptés tels que la persévération.

Notre hypothèse est que le système limbique (réponse émotionnelle) joue le rôle d'un mécanisme d'alarme cognitif et qu'il oriente et focalise l'attention sur le conflit jusqu'à sa résolution en inhibant le lobe préfrontal. L'idée qui en découle est que cette inhibition, induite par les effets du stress, affecte le contrôle cognitif conscient et favorise l'émergence de processus cognitifs automatiques.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons cherché à éprouver le modèle des conflits à travers une démarche empirique. Dans ce sens nous avons utilisé un environnement de simulation aéronautique (LIPS) dans lequel des expérimentations ont été conduites avec une dizaine de pilotes. Ceux-ci avaient à réaliser une tâche de navigation dont la réussite dépendait d'une gestion adaptée du carburant dans la conduite de leur mission.

Nous avons proposé une méthode fondée sur le suivi de situation pour analyser l'activité de pilotage et en particulier détecter les conflits. Son principe repose d'une part sur la modélisation de la tâche à accomplir (mission, procédures de vol) et d'autre part sur la reconstitution partielle de l'activité réelle du pilote à partir des paramètres de vol, enregistrés au cours des simulations. C'est en analysant les incohérences entre les propriétés du modèle de référence et les propriétés de l'activité observée et au vu des connaissances cruciales que nous pouvons mettre en évidence des conflits.

Les résultats de ces expérimentations semblent aller dans le sens d'une validation de nos hypothèses puisque les deux conflits que nous avons détectés ont été ressentis en tant que tels par les pilotes. Ces conflits se sont produits alors que les pilotes cherchaient à atteindre un but qu'ils ne pouvaient ou n'arrivaient pas à atteindre, et ces buts de surcroît étaient cruciaux puisqu'ils consistaient en un ravitaillement pour finir la mission. Les deux pilotes ont

fait face à un conflit de représentation puisque leur interprétation du monde étaient différente de la réalité.

Ensuite, il est intéressant de constater que ces situations conflictuelles ont été associées à une réponse comportementale de persévération, c'est-à-dire que les pilotes se sont enfermés dans un raisonnement erroné. Le conflit a été focalisateur d'attention : trop concentrés sur la résolution du problème (trouver le point tournant), aucun des pilotes n'a été capable de trouver l'information pertinente pourtant disponible dans le cockpit, et ils ont relâché leur surveillance du paramètre altitude. Le comportement de ces pilotes en simulateur est tout à fait proche de celui des équipages civils dont nous avons décrit les accidents en début de deuxième chapitre : c'est leur focalisation excessive sur la résolution du conflit qui les a amenés à perdre leur conscience de la situation et à s'écraser. La mise en évidence de ce thème spécifique de la " persévération " dans notre étude des conflits et les conséquences graves que ce comportement entraîne nous ont conduit à procéder à une analyse spécifique de cette catégorie et à rechercher des solutions palliatives. C'est l'objet des chapitres qui suivent.

Chapitre 6

Ghost : environnement expérimental de contre-mesures cognitives

6.1 Introduction

L'idée maîtresse de ce chapitre est de présenter un concept pour contrer le mécanisme de persévération et de mettre en place des moyens pour le rendre opérationnel et le tester. Le concept est le retrait de l'information, seule façon apparente, et nous allons le voir à travers une argumentation pour enrayer le mécanisme de la persévération. Un premier moyen est celui des contre-mesures, amené récemment en psychologie, pour mettre en œuvre ce principe de retrait d'information et en proposer plusieurs variantes. Le deuxième moyen est l'environnement expérimental Ghost, mis au point par notre équipe, qui est destiné à valider expérimentalement le retrait d'information. Le système Ghost est composé d'un simulateur de vol, d'un logiciel de suivi sur carte de l'appareil et d'une interface du magicien d'Oz. L'interface du magicien d'Oz offre la possibilité à un opérateur d'intervenir en temps réel durant les simulations. Elle permet de placer les pilotes dans des situations conflictuelles (panne, modification de la météorologie), d'enregistrer leurs activités pour une exploitation ultérieure, mais surtout d'envoyer des contre-mesures pour assister les pilotes.

Nous examinerons dans ce chapitre les différents éléments qui constituent l'environnement Ghost : tout d'abord les contre-mesures, ensuite les logiciels de simulation utilisés et nous nous arrêterons plus précisément sur l'interface du magicien d'Oz.

6.2 Contre-mesures cognitives

6.2.1 Définition des contre-mesures

Le terme contre-mesure est utilisé essentiellement dans le domaine militaire et particulier de la guerre électronique, il désigne l'ensemble des moyens (brouillage...) pour contrer une menace ennemie (missile...) [Rey-Debove et Rey, 1994]. En sciences humaines, ce terme est employé par un groupe de travail de la Nasa (National Aeronautics and Space Administration) engagé dans un projet de recherche appelé " *Fatigue Countermeasure Program* ". L'objectif de ce programme [Neri *et al.*, 2002] est l'étude des problèmes de sécurité lié à la fatigue des pilotes de long courrier. Il se concentre sur plusieurs points :

- évaluer la fatigue et ses répercussions sur les cycles circadiens des équipages ;
- déterminer les effets de la fatigue sur la performance de pilotage ;
- concevoir des contre-mesures et mesurer leur efficacité à réduire les effets de la fatigue, augmenter la performance des équipages, et améliorer leur niveau de vigilance.

Des études de marqueurs psycho-physiologiques lors de campagnes d'expérimentations sur simulateur de Boeing 747 ont permis de définir des périodes de sieste de 26 minutes. Ainsi, les contre-mesures proposés par la Nasa pour lutter contre les effets de la fatigue consiste en recommandations de prise de période de repos.

On retrouve également l'emploi de ce terme dans l'approche accidentologique de la conduite automobile de l'Inrets [Van Eslande, 2001]. Cette approche est motivée par la description des mécanismes d'accidents types pour dégager des généralités sur le comportement des automobilistes. L'intérêt d'une telle approche est d'enrichir les connaissances sur l'implication des différents processus à l'œuvre lors des accidents mais aussi sous un angle opérationnel pour proposer des contre-mesures *ou* aides à la conduite .

Plus que des recommandations, nous proposons que les contre-mesures soient un véritable moyen d'action direct pour contrer les effets indésirables (hypovigilance, persévération) d'une perturbation (fatigue, stress excessif..). Dans le cadre de notre étude, nous parlerons de *contre-mesures cognitives* qui consistent en l'envoi de stimuli pour pallier un biais cognitif [Evans, 1990], c'est-à-dire une tendance humaine à prendre en compte les facteurs non pertinents pour la tâche à résoudre.

DÉF. 6.1 (Contre-mesure cognitive) Une contre-mesure cognitive désigne tout moyen d'action qui pallie un biais cognitif.

6.2.2 Principe des contre-mesures cognitives

Les contre-mesures que nous cherchons à mettre au point dans ce chapitre sont destinées à contrer la persévération dans l'activité de pilotage. En préambule, rappelons les signes qui trahissent un comportement de persévération dans l'activité de pilotage :

- faire face à une situation conflictuelle dans la gestion du vol ;
- s'enfermer dans une mauvaise stratégie de résolution ;
- être insensible aux alarmes visuelles et sonores.

C'est la détection de conflit qui identifie la persévération et son objet, puis permet d'élaborer les contre-mesures au vu des procédures et de la situation du pilote.

Conception des contre-mesures : le retrait d'information

Traditionnellement, c'est l'envoi d'alarmes visuelles ou sonores qui permet de prévenir ou d'attirer l'attention des pilotes sur une panne d'un système ou sur un événement important ; c'est-à-dire que l'on ajoute de l'information pertinente dans le cockpit. Or ce principe montre ses limites et n'est d'aucun effet lorsque les pilotes persévèrent : de nombreux rapports d'événements aériens confirment cette tendance et parmi des analyses récentes du B.E.A. [BEA, 2003b], on trouve des cas de conflit dangereux entre des équipages et leurs systèmes automatiques (du type " qui dirige quoi dans l'avion ? "), situations dues en partie au fait que les pilotes n'ont pas porté attention aux alarmes visuelles et sonores qui les prévenaient d'une évolution du mode de pilotage automatique.

Au contraire, les contre-mesures que nous proposons en prennent le contre-pied et résident sur l'idée d'un retrait d'information. Son principe en est le suivant :

- il est ciblé, c'est-à-dire que l'information (ex : cadrans) sur laquelle le pilote persévère est enlevée ;
- il s'intercale avec l'envoi d'un message visuel d'alerte ;
- il est momentané, puisque la suppression ne dure que quelques instants.

L'objectif suivi est de briser la persévération en retirant l'objet de l'obnubilation du pilote, puis d'envoyer un message à la place de l'information supprimée. Ce message a pour but de prévenir expressément de surveiller un paramètre de vol important (ex : l'altitude) ou de fournir des éléments de résolution de conflit. En envoyant ce message là où le pilote est excessivement focalisé de par sa persévération, on glisse une information pertinente dans son champ visuel, forçant ainsi sa prise en compte.

Cela nécessite :

- soit une connaissance experte sur les zones de prise d’information spécifique des pilotes en fonction des phases de vol (ex : modèle d’activité de pilotage) ;
- soit d’utiliser un moyen en temps réel de détermination de la zone de vision fovéale (ex : eye tracker).

Exemple de contre-mesure cognitive

Illustrons ce principe par un exemple : dans nos expérimentations précédentes, nous avons décrit le cas d’un pilote qui a persévéré à atteindre un point tournant (le waypoint 5) en croyant qu’il s’agissait d’une zone de ravitaillement (en fait le waypoint 6). Le conflit est détecté par notre outil de suivi de situation, et l’analyse de l’activité de pilotage permet de déterminer que le pilote se focalise sur une boussole en V.T.H.¹ pour rejoindre le point tournant 5. On rompt ce mécanisme de persévération en enlevant momentanément cette boussole, puis en envoyant à la place le message “ Aller au point 6 pour ravitaillement ”.

Justification théorique du retrait d’information

En neuropsychologie, Posner [Posner, 1975] propose que l’attention repose sur un mécanisme antagoniste d’accrochage et de décrochage. Ce qui veut dire que pour poser son regard sur un item, il faut préalablement décrocher son attention de l’item courant pour ensuite accrocher celui sur lequel on souhaite s’intéresser. Ces mécanismes ont pu être décrits par l’étude de patients cérébrolésés présentant des troubles de décrochage de l’attention (hémignégligence, extinction). Par ailleurs, dans le cadre de l’attention visuelle [Camus, 1996], on montre l’existence d’un couplage fonctionnel entre un système postérieur d’orientation du regard et un système antérieur qui constitue la base du contrôle volontaire de l’attention (contrôle frontal). Dans la section 3.3 nous avons traité de l’effet du stress sur le contrôle frontal : ainsi, si l’on se positionne dans le paradigme d’un continuum cognitif entre des patients cérébrolésés et des opérateurs stressés ou fatigués [Pastor, 1999], alors on peut postuler que les opérateurs qui persévèrent ne sont pas sensibles aux alarmes ou ont du mal à trouver de l’information pertinente puisqu’ils sont incapables de décrocher volontairement leur attention de la tâche qui les accapare pour accrocher de nouveaux stimuli. Le principe des contre-mesures est justement de pallier cela en faisant “ décrocher ” l’interface à la place des

¹Vision Tête Haute, c.f. figure 5.2

pilotes : l'information sur laquelle se focalise le pilote est supprimée puis est remplacée par un message pertinent pour le pilotage.

6.3 Ghost

Dans le but d'expérimenter les contre-mesures cognitives visant à sortir le pilote de sa persévération, nous avons développé un environnement expérimental [Schwach, 2002 ; Grisel, 2002 ; Chaudron *et al.*, 2002]. Ce système est constitué de flight gear, un simulateur de vol, d'Atlas un logiciel qui permet de suivre en temps réel la route du pilote sur une carte et de l'interface du magicien d'Oz que nous avons conçue (c.f. figure 6.1). Un des avantages de cet environnement est sa grande souplesse d'utilisation : deux ordinateurs portables reliés entre eux par liaison ethernet et un vidéo-projecteur sont suffisants pour conduire les expérimentations. Ainsi nous disposons d'un matériel aisément portable pour nous déplacer afin de réaliser les simulations.



Pilote dans le simulateur de vol

← TCP/IP CONNECTION →



Interface du magicien d'Oz

Atlas

FIG. 6.1: Environnement Ghost

6.3.1 Le simulateur de vol : FlightGear

FlightGear ² est un simulateur de vol qui propose de nombreux modèles de vol (du monomoteur Cessna 172 au Boeing 737), et intègre l'ensemble des aéroports et balises de radionavigation du monde ainsi que le contrôle aérien (c.f. figure 6.2). Ce logiciel a été choisi pour les raisons suivantes :

- il est multi plates-formes (Linux, Windows, Macintosh) ;
- la communauté des développeurs est très active ;
- de nombreuses institutions académiques ou de recherche l'utilisent déjà pour différents types d'études ;
- le support est disponible par mailing list ;
- il est suffisamment opérationnel pour nos expérimentations ;
- les sources sont disponibles sous licence GPL (utilisation et modification libres), ce qui permet d'adapter le simulateur à nos contraintes expérimentales ;
- il offre des possibilités de connexions réseau pour interactions à distance ;
- ses variables sont facilement modifiables *via* un arbre de propriété ;
- on a la possibilité de modifier le cockpit par une programmation simple en langage XML.

Pour réaliser les expérimentations, notre choix s'est porté sur un avion bimoteur, le Cessna 310 : il s'agit d'un des avions les plus aboutis dans FlightGear et son interface est familière à de nombreux pilotes.

Modifications apportées au simulateur de vol FlightGear

La réalisation de nos expérimentations nécessite un certain nombre de mises au point sur le simulateur FlightGear. La première modification est de faciliter la simulation en programmant des raccourcis clavier et des boutons sur le joystick afin de donner accès aux pilotes à toutes les fonctions présentes dans l'avion (volets, trains d'atterrissage, réglage fréquence radio, pas de l'hélice...) La configuration du joystick et du clavier a été validée par trois pilotes, tous stagiaires à l'Onera et ayant entre 100 heures et 500 heures de vol sur planneur et avions monomoteurs. La deuxième modification a consisté à intégrer une interface de dialogue dans le cockpit (**Onera Messenger**), ce qui permet à l'expérimentateur d'envoyer des messages (résolution de conflits, messages d'alerte, consignes...) au pilote durant la simulation :

²<http://www.flightgear.org/>

FIG. 6.2: *Simulateur FlightGear*

6.3.2 Atlas

Nous utilisons par ailleurs le logiciel libre Atlas³ (voir figure 6.4). Ce logiciel se connecte par liaison UDP (unidirectionnelle) sur le simulateur FlightGear et permet à l'expérimentateur de faire un suivi sur carte en temps réel de la navigation réalisée par les pilotes. *A posteriori*, ces cartes fournissent un support pratique pour discuter avec les pilotes durant les séances de debriefing pour mieux analyser leur comportement.

³sources disponibles à?http://atlas.sf.net



FIG. 6.3: Interface graphique **Onera Messenger** intégrée dans le cockpit pour les simulations. L'expérimentateur a la possibilité d'envoyer des messages de types alerte (en rouge) ou nominal (en vert), selon les besoins de l'expérimentation.

6.3.3 L'interface du "magicien d'Oz"

Le but de l'environnement Ghost est d'évaluer l'effet des contre-mesures sur la persévération. Pour tester ces contre-mesures, l'expérimentateur doit disposer d'un dispositif pour créer des situations expérimentales qui mettent les pilotes en situation de persévération mais aussi de moyens pour élaborer et envoyer les contre-mesures. C'est le rôle de l'interface présentée ici.

Cette interface est de type magicien d'Oz, car les sujets expérimentaux (les pilotes) ignorent que les contre-mesures, les messages, ou les pannes sont élaborés à distance par un opérateur humain (l'expérimentateur). On met ainsi les pilotes dans une position naturelle de dialogue et d'interaction avec son interface.

L'interface graphique du Magicien d'Oz se compose de cinq pages, chacune offrant des possibilités d'interaction particulières avec le simulateur de vol :

- la première page permet un accès aisé à toutes les variables du simula-

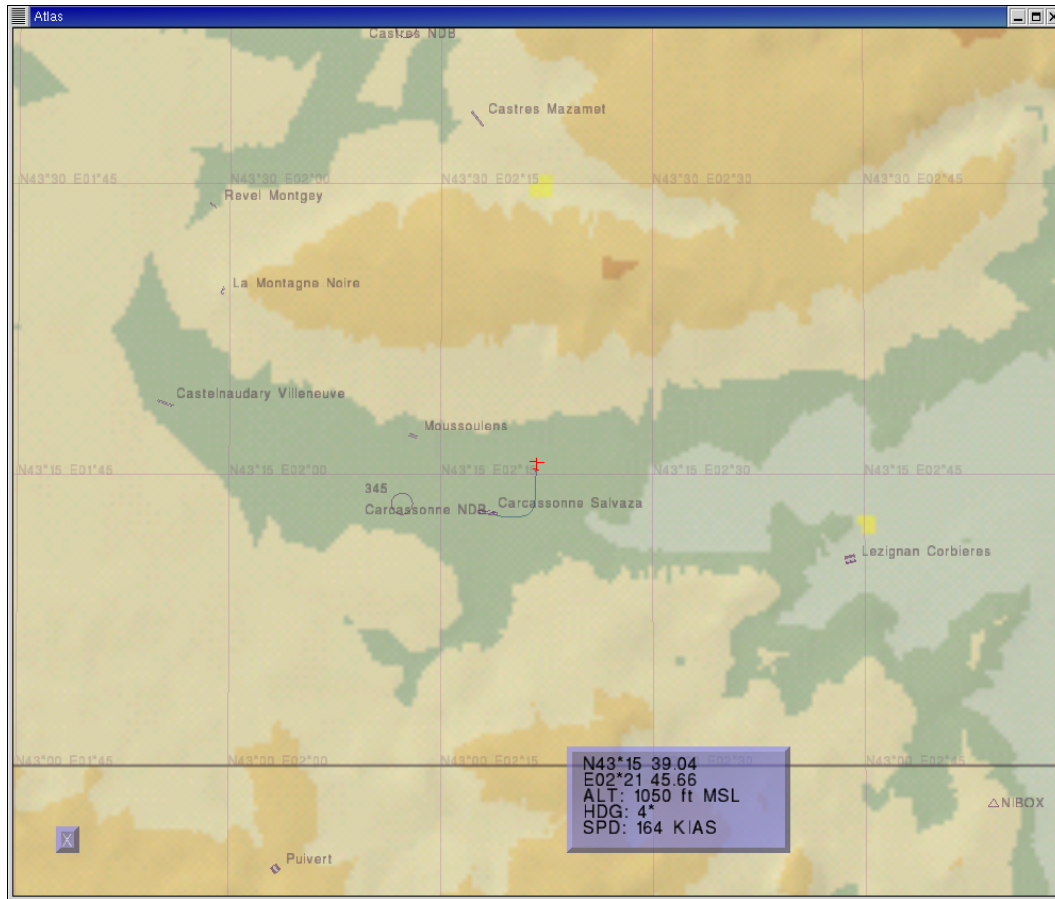


FIG. 6.4: *Suivi sur carte avec Atlas*

- la deuxième page concerne les perturbations météorologiques : l'expérimentateur peut créer une dépression qui réduira la visibilité extérieure du pilote ;
- sur la troisième page, l'expérimentateur peut lancer le suivi sur carte ;
- la quatrième page permet d'agir sur l'interface graphique **Onera Messenger** : l'expérimentateur peut y envoyer des messages (nominaux ou d'alerte), ou les effacer.
- la dernière page contient tous les cadrans que le pilote voit dans son cockpit et offre à l'expérimentateur plusieurs actions sur ces cadrans, susceptibles de sortir le pilote de sa persévération.

Page 1 : modification des paramètres de l'avion

La première page “ View Tree ” du magicien d'Oz, donne accès à l'arbre de propriétés de FlighGear, permettant d'accéder aux différentes variables du simulateur et de les modifier selon les besoins de l'expérimentation (visibilité, positions des volets, consommation de carburant, direction du vent...). Par cette page, l'expérimentateur peut provoquer des situations conflictuelles en affichant des valeurs contradictoires sur les différents cadrans présents dans la planche de bord.

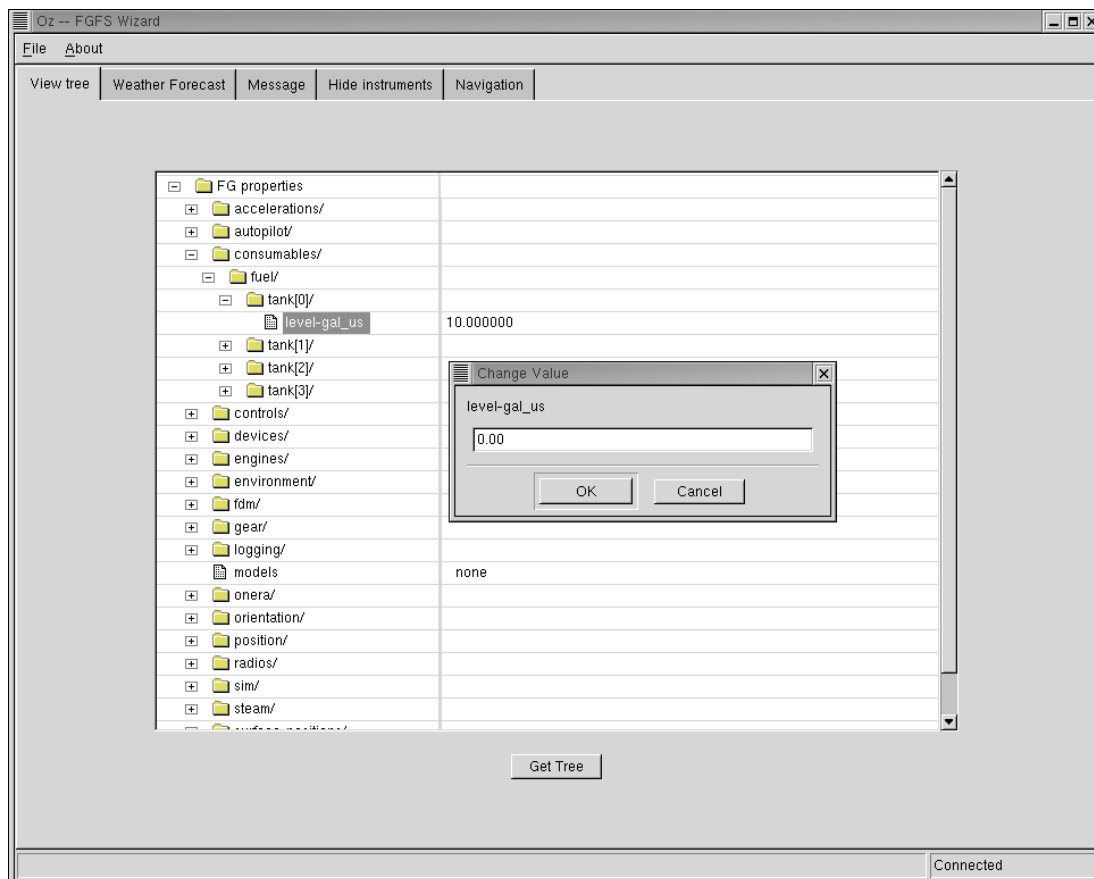


FIG. 6.5: Page 1, l'arbre de propriété : en cliquant sur “ Get Tree ” on obtient une mise à jour des variables du simulateur. Pour changer le contenu d'une variable il faut ouvrir le répertoire qui la contient en double-cliquant dessus, puis cliquer sur ladite variable : une boîte de dialogue s'affiche et la saisie d'une valeur va la modifier. Sur cette capture d'écran, la valeur de la variable tank[0], qui correspond à la quantité de carburant dans le réservoir du moteur gauche, est annulée. Ainsi, dans la simulation le moteur gauche cale immédiatement.

Page 2 : dégradation météorologique

La page 2 de l'interface du magicien d'Oz est destinée à dégrader les conditions de visibilité lors des simulations et laisse la possibilité à l'expérimentateur de choisir entre trois tailles de nappes de brouillard (8, 12 ou 16 km de rayon). À mesure que les pilotes s'enfoncent et convergent vers le cœur de la nappe, la visibilité se réduit pour devenir nulle. Ces nappes peuvent être placées en se servant de la carte représentant les environs de Toulouse.

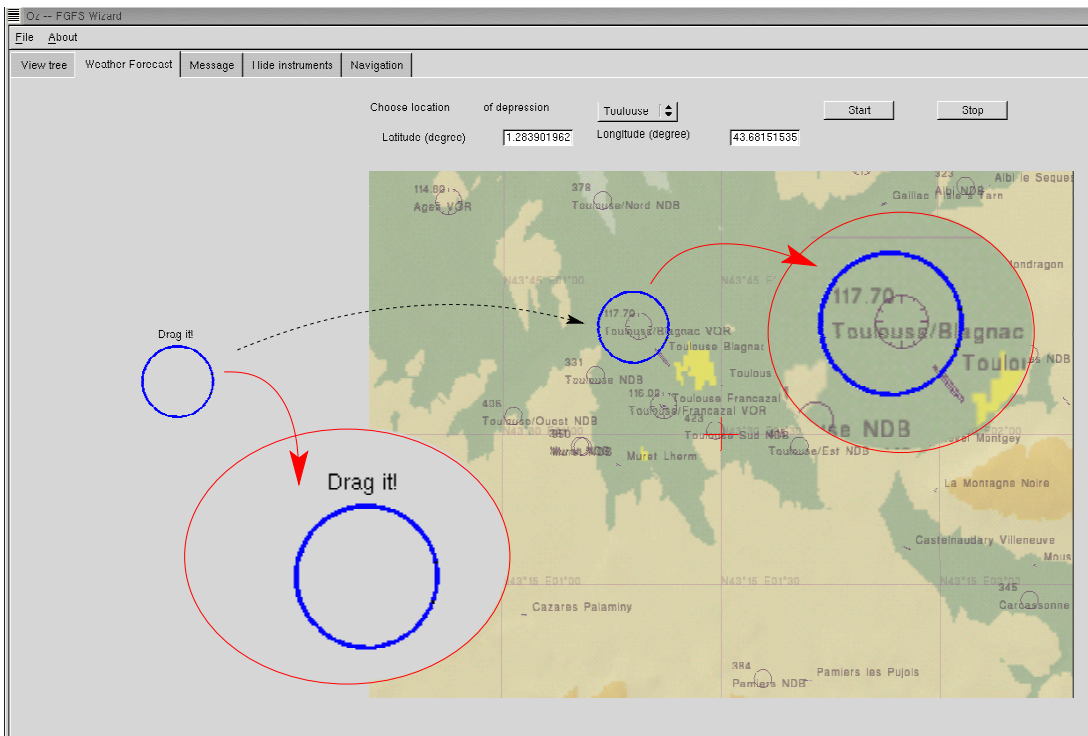


FIG. 6.6: Perturbation météorologique : un clic sur "Add Dep" crée un cercle de taille proportionnelle à la taille de la nappe de brouillard choisie et un glissé-déposé place cette dernière sur la carte. Les coordonnées sont calculées automatiquement. On active le brouillard avec le bouton " Start " et on l'arrête à l'aide du bouton " Stop " pour remettre la visibilité au maximum.

Page 3 : suivi sur carte

La troisième page du magicien d'Oz (c.f. figure 6.7) est destinée à sélectionner un scénario parmi l'éventail des possibles et à déclencher l'enregistrement des paramètres de vol. C'est aussi de cette page que se lance le

logiciel Atlas pour suivre la route du pilote : l'expérimentateur peut ainsi visualiser la trajectoire du pilote et avoir une meilleure perception de la situation du pilote pour élaborer les contre-mesures.

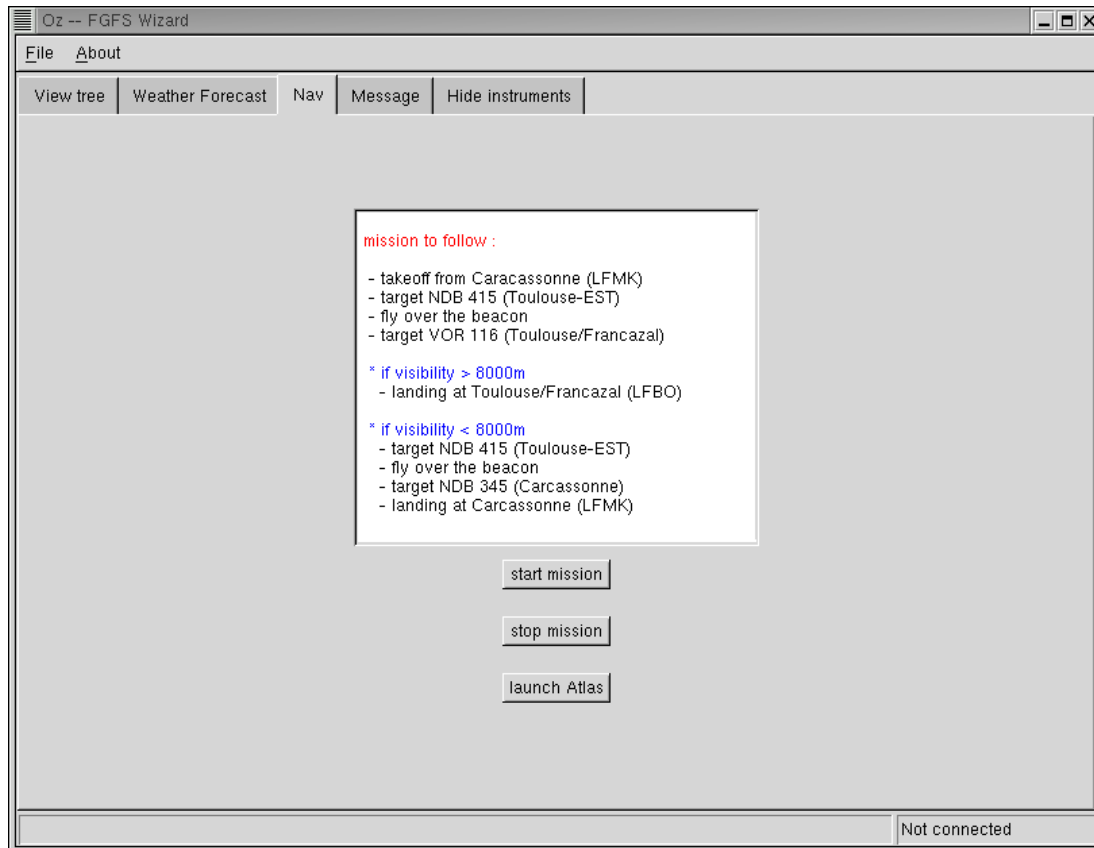


FIG. 6.7: Troisième page du Magicien d'Oz : la zone de texte correspond au scénario sélectionné, les boutons " start mission " et " stop mission " permettent de lancer puis d'arrêter l'enregistrement des paramètres de vol durant les simulations ; le bouton " launch Atlas " quant à lui lance le suivi sur carte à l'aide d'Atlas.

Page 4 : envoi de messages

Cette page (c.f. figure 6.8) est consacrée à l'envoi de messages vers le pilote durant les expérimentations *via* l'interface graphique **Onera Messenger** que nous avons intégrée dans le cockpit. Un message envoyé en " nominal " apparaîtra en vert, un message envoyé en " alerte " apparaîtra en rouge et un message long sera automatiquement fractionné. À chaque envoi d'un message, un voyant clignote et deux bips sonores sont émis dans le cockpit. L'interface graphique **Onera Messenger** possède une fonction ascenseur qui offre

la possibilité aux pilotes de faire défiler les messages. De plus, de son côté, l'expérimentateur dispose d'un historique des dix derniers messages adressés (partie "Display Overview" de l'exemple 6.8).

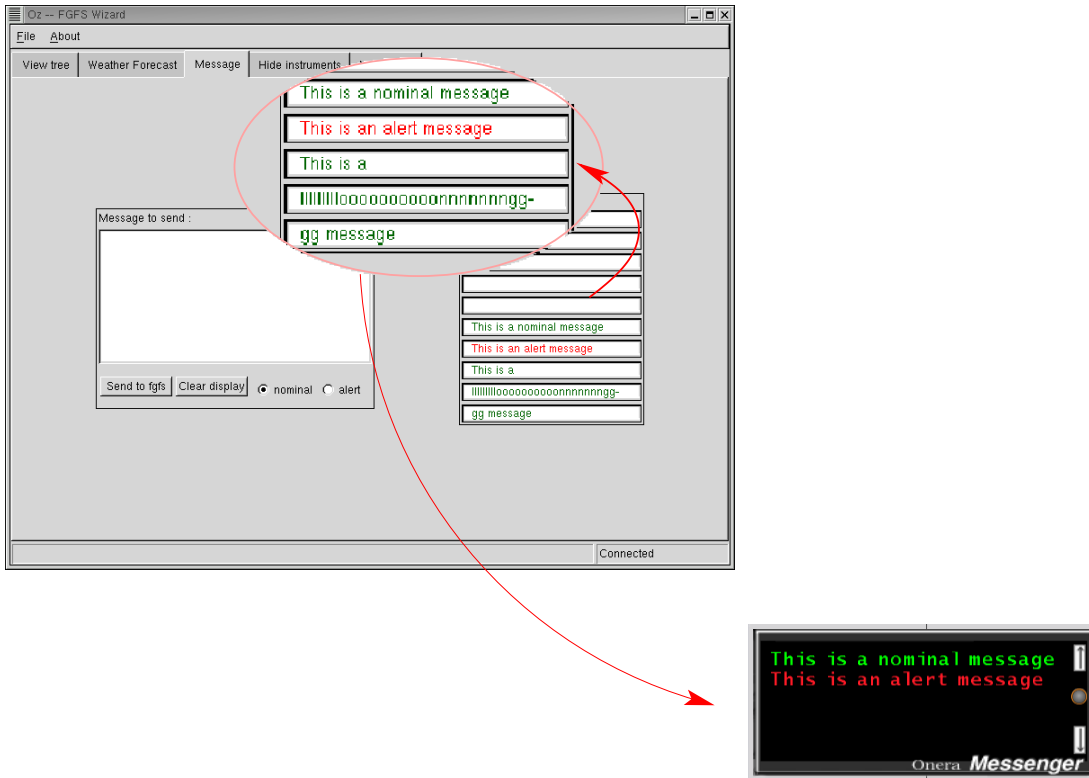


FIG. 6.8: Envoi de messages : l'expérimentateur peut envoyer des messages au pilote grâce à la page 4 du Magicien d'Oz (en haut à gauche) pour les faire apparaître dans le cockpit via l'interface **Onera Messenger** placée dans le cockpit (en bas à droite).

Page 5 : les contre-mesures

La dernière page du magicien d'Oz appelée "Hide instruments" (c.f. figure 6.9) est vouée aux contre-mesures. Sur cette page, l'expérimentateur a à sa disposition plusieurs moyens pour sortir le pilote de sa persévération en envoyant des contre-mesures. Le retrait d'information peut se faire de deux façons différentes :

- substituer un cadran où le pilote se focaliserait par un écran noir en décochant la case de l'instrument correspondant ;
- faire clignoter un cadran en cliquant sur l'image de l'instrument.

Enfin la dernière fonction de cette page consiste à adresser de courts messages expliquant le conflit qui s'inscriront dans le cadran lorsque ce dernier clignote

ou disparaît.

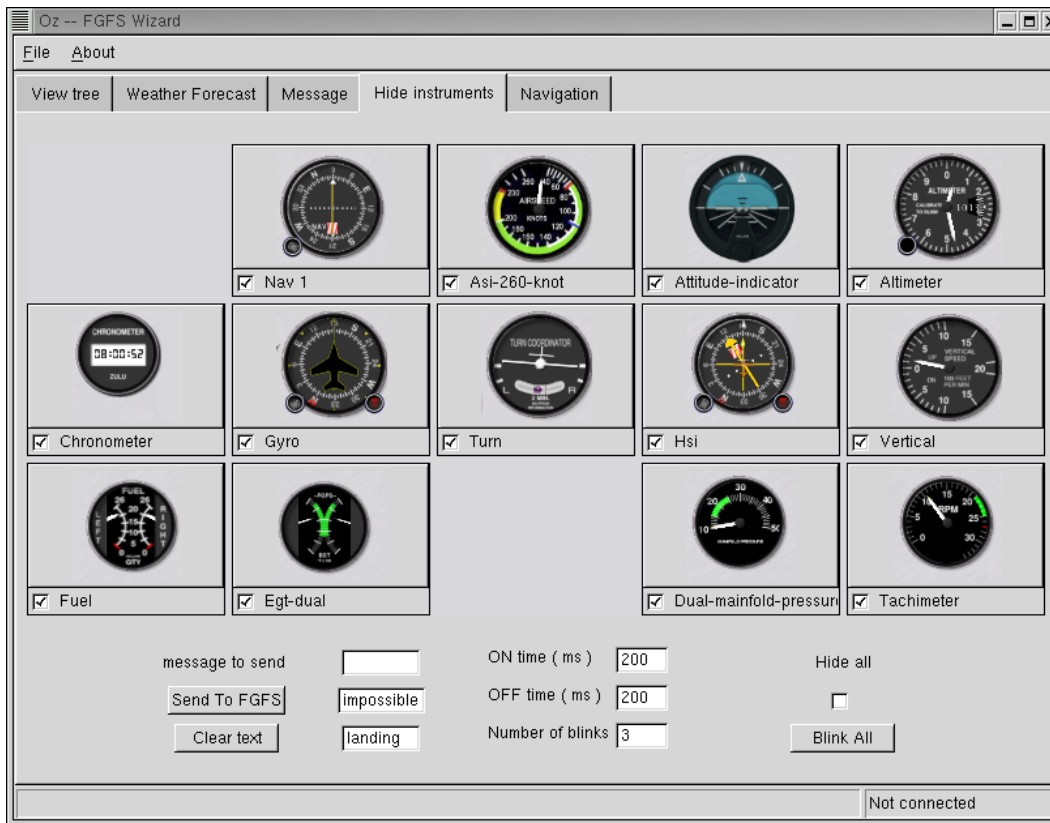


FIG. 6.9: Élaboration des contre-mesures : décocher un cadran fait disparaître l'instrument correspondant dans le cockpit du pilote ; cliquer sur un cadran le fait clignoter suivant les paramètres désirés (sur cette capture d'écran l'instrument clignote 3 fois, disparaissant et apparaissant pendant 300ms). Cocher " Hide all " fait disparaître tout les cadrans, un click sur " Blink all " fait clignoter tout les instruments. Les trois champs de texte en bas en gauche permettent de composer un message et de l'envoyer dans le cockpit à la place du cadran supprimé par l'intermédiaire du bouton " Send to FGFS ".

6.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons introduit le concept de contre-mesures, définies comme un ensemble de moyens destinés à contrer les effets d'une perturbation cognitive. L'élaboration de contre-mesures pour lutter contre le syndrome de persévération repose sur les résultats théoriques et empiriques suivants :

- les situations conflictuelles amènent les pilotes à persévérer ;
- l'ajout d'information, comme les alarmes sonores et visuelles, classiquement utilisé pour prévenir les pilotes, est souvent négligé par ces derniers lorsqu'ils persévèrent.

Conforté par des résultats en neuropsychologie de l'attention, un moyen pour contrer la persévération est de retirer de l'information sur l'interface du pilote. Ce retrait d'information est ciblé puisqu'il s'agit d'enlever les éléments de connaissances (ex : un cadran) qui fait persévérer à tort le pilote et qui concentre son attention au détriment de la surveillance de l'ensemble des paramètres vitaux. Cette information est ensuite substituée par une autre qui doit aider le pilote à sortir de son obnubilation ou à attirer son attention sur un autre paramètre vital.

Pour tester ces contre-mesures notre équipe a développé l'environnement expérimental Ghost. Il est constitué d'un simulateur de vol, d'un logiciel de suivi de route et d'une interface de magicien d'Oz. Le but est de disposer d'un environnement d'étude de la persévération : le simulateur de vol permet de mettre aux commandes des pilotes, l'interface du magicien d'Oz et Atlas sont destinés à créer des scénarios expérimentaux, à envoyer des perturbations aux pilotes pour les mettre en situation de persévération mais aussi à élaborer des contre-mesures pour les sortir de leur persévération.

Chapitre 7

Deuxième expérimentation

7.1 Introduction

Nous présentons ici une expérimentation pour tester le principe des contre-mesures avec l'environnement Ghost exposé au chapitre précédent. Le principe est de placer sciemment les pilotes dans des situations conflictuelles destinées à les faire persévérer puis d'envoyer des contre-mesures pour évaluer leur capacité à rompre ce mécanisme d'obnubilation.

Trois scénarios ont été élaborés et proposés indifféremment aux 22 pilotes qui participent à ces expériences. Bien que ces scénarios présentent des variantes propres, leur principe propre réside dans l'impossibilité pour les pilotes de rejoindre un but crucial de la mission. Pour perturber l'activité des pilotes et remettre en cause le plan de vol initial, nous utilisons une perturbation météorologique. Le deuxième intérêt de cette méthode est que la dégradation des conditions de visibilité oblige les pilotes à se focaliser sur certains cadrans, cadrans à partir desquels nous pourrions envoyer les contre-mesures.

Nous examinerons successivement dans ce chapitre les trois scénarios, les contre-mesures mises en œuvre dans ces expérimentations pour assister les pilotes et la méthode expérimentale. Puis, nous commenterons les résultats de nos expériences en nous appuyant sur des aspects tant objectifs que subjectifs car il s'agit d'analyser l'efficacité des contre-mesures sur l'activité de pilotage, mais aussi d'exposer le ressenti des pilotes. Nous nous intéressons particulièrement aux réactions des pilotes étant donné le caractère particulier du concept de retrait d'informations que nous souhaitons tester au cours de ces expérimentations.

7.2 Principe des expériences

L'objectif de ces expériences est d'éprouver les contre-mesures (c.f. section 6.2) en plaçant les pilotes dans une tâche qui les amène à persévérer puis à les en sortir en jouant sur le principe du retrait d'information. Ensuite, et ce point est important, considérant le caractère particulier des contre-mesures, il nous faut également montrer que l'altération de l'interface par suppression d'information ne va pas dégrader dangereusement l'activité des pilotes. Car, si le but est bien de faire *dé-persévérer*, il ne s'agit pas, une fois le mécanisme d'obnubilation brisé, de perturber davantage le pilote en le paniquant par la brusque disparition de données dans son cockpit.

Le premier point est de provoquer l'apparition de la persévération dans l'activité des pilotes. Puisque nos expériences précédentes et l'analyse des accidents suggèrent que le conflit mène à la persévération, on se propose de mettre les pilotes dans des situations conflictuelles qui les conduiront à l'obnubilation.

Le deuxième point est de sortir les pilotes de leur persévération. C'est la tâche du magicien d'Oz, autrement dit l'expérimentateur, qui par son analyse de la situation du pilote va élaborer les contre-mesures, puis déclencher leur envoi dans l'interface du simulateur de vol FlightGear.

7.3 Scénarios expérimentaux

D'après nos hypothèses, un conflit se produit lorsqu'un agent (ou groupe d'agents) ne peut mener à bien un but important. Ainsi, les trois scénarios sont conçus de telle manière qu'un but crucial de la mission est impossible à réaliser :

- dans les scénarios 1 et 2, la dégradation de la visibilité rend impossible de finir la mission, c'est-à-dire l'atterrissage sur la piste de Toulouse-Francazal ;
- dans le scénario 3, une panne de moteur empêche d'atteindre l'objectif final de la mission.

7.3.1 Scénario 1

Le scénario 1 (c.f. figure 7.1) consiste en une tâche de navigation depuis l'aéroport de Toulouse-Blagnac jusqu'à l'aéroport de Francazal en passant par

trois points tournants (VOR 117.70, NDB 331 et NDB 423¹). Une zone de brouillard est placée de telle manière que le pilote ne puisse voir la piste d'atterrissage qu'au dernier moment c'est-à-dire quand il est trop tard pour se poser.

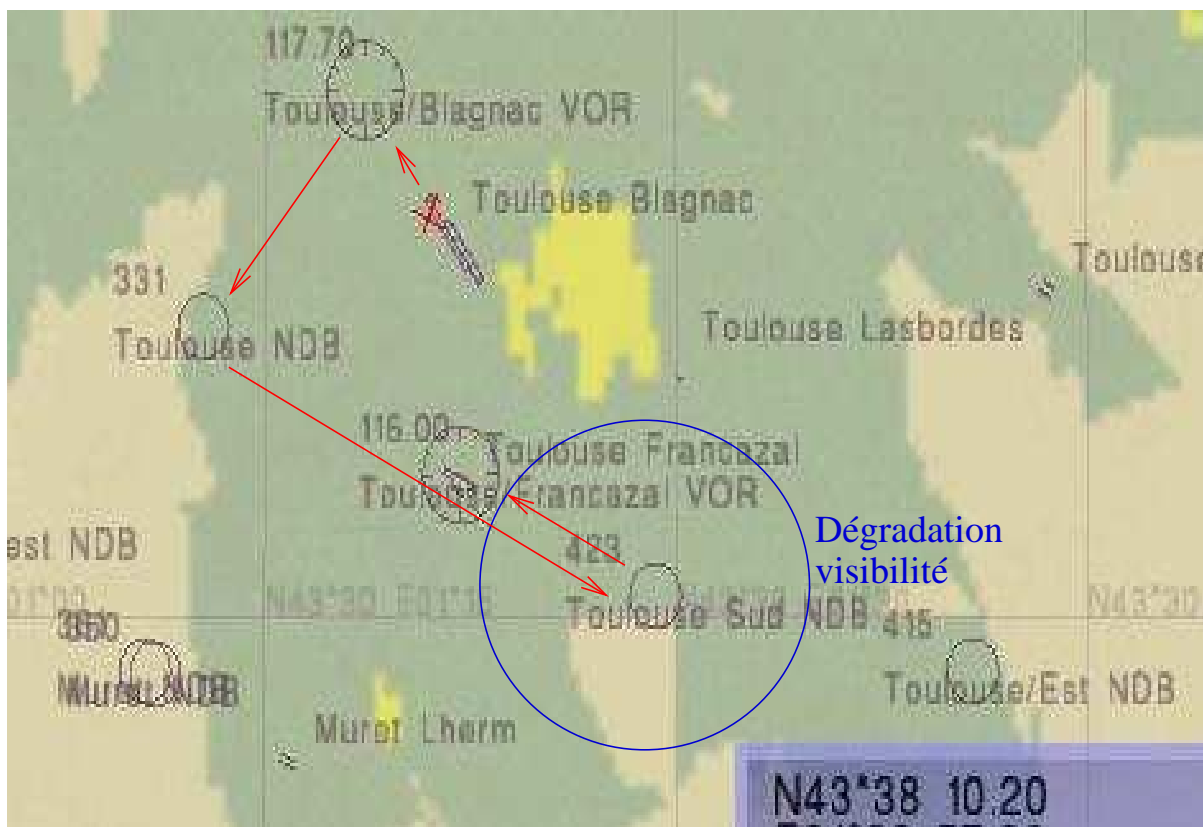


FIG. 7.1: *Le scénario 1*

7.3.2 Scénario 2

Le scénario 2 (c.f. figure 7.2) consiste en une tâche de navigation depuis l'aéroport de Toulouse-Blagnac jusqu'à l'aéroport de Francazal en passant par trois points tournants (VOR 117.70, NDB 415 et NDB 423). Cette fois-ci une zone de brouillard est située en seuil de piste, de manière à ce que le terrain soit visible de loin mais, à mesure que le pilote s'en rapproche, la piste disparaît sous un épais nuage.

¹Les VOR (Very high frequency Omnidirectionnal Range, radiophare omnidirectionnel) et les NDB (Non Directional Beacon) sont deux types de balises qui permettent de guider les avions à l'aide de signaux radio-électriques.

FIG. 7.2: *Le scénario 2*

7.3.3 Scénario 3

Le scénario 3 (c.f. figure 7.3) est une tâche de navigation depuis un décollage de Toulouse-Blagnac, un passage sur trois points tournants (VOR 117.70, NDB 331 et NDB 423) puis un atterrissage sur Toulouse-Blagnac. Une zone de brouillard est placée dans la région du point tournant 2 (NDB 331) et alors que pilote s’y dirige, une panne du moteur gauche est déclenchée par le magicien d’Oz.

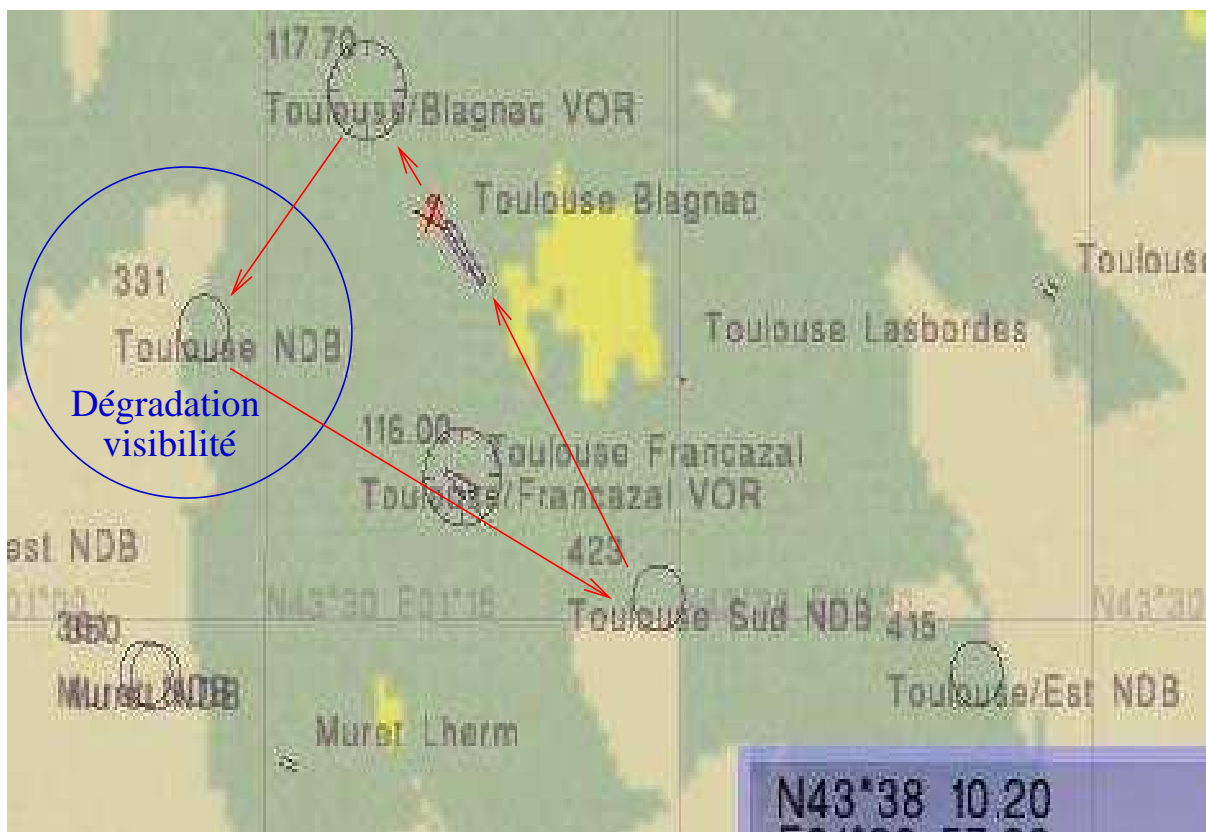


FIG. 7.3: Le scénario 3

7.3.4 Synthèse sur les scénarios

De manière générale, le conflit dans ces scénarios repose sur le dilemme suivant : le pilote doit-il interrompre la mission contrairement à ce qui est demandé dans le plan de vol ou bien la poursuivre mais risquer un accident. Par exemple, dans les scénarios 1 et 2, le conflit du pilote peut se résumer par "Dois-je tenter un atterrissage dangereux à Francazal conformément à mes ordres ou dois-je retourner à Blagnac pour un atterrissage en toute sécurité ?" Si notre conjecture est exacte, les pilotes vont persévérer pour atterrir à Francazal. Enfin, dans le scénario 3, le conflit du pilote peut se résumer ainsi : "Dois-je continuer la mission en dépit de la panne ou dois-je atterrir à Francazal et abandonner la mission ?"

7.4 Contre-mesures cognitives

Une des difficultés dans l'élaboration des contre-mesures est de déterminer où envoyer les contre-mesures dans le cockpit pour qu'elles soient perçues par les pilotes. Ainsi nos expériences sont calibrées pour s'assurer de l'endroit où le pilote va poser son regard au moment du conflit. Dans les trois scénarios, l'apparition du brouillard à l'origine du conflit, provoque la focalisation du pilote sur son H.S.I (Horizontal Situation Indicator, c.f. figure 7.4), un cadran qui lui indique la route à suivre à partir des informations radio-électriques d'une balise VOR ou NDB.



FIG. 7.4: Le H.S.I. (encadré de rouge) est un outil de radio navigation qui donne la route à suivre à l'aide d'un axe orienté.

Si le pilote persévère à faire un atterrissage (scénarios 1 et 2) ou à poursuivre sa navigation sur un seul moteur (scénario 3), c'est en utilisant le H.S.I.

Le premier moyen pour rompre l'entêtement du pilote à poursuivre sa navigation dans le brouillard est de retirer du cockpit ce cadran pendant une certaine période (c.f. figure 7.5) : l'idée est de provoquer un choc pour faire prendre du recul au pilote, mais surtout l'empêcher momentanément de poursuivre cette tâche puisqu'il ne dispose plus d'indicateur de route.



FIG. 7.5: Retrait d'information sur le H.S.I.

7.4.1 Contre-mesures cognitives pour les scénarios 1 et 2

Dans cette sous-section, nous détaillons les contre-mesures plus particulièrement adaptées aux deux premiers scénarios et qui utilisent toutes les capacités d'interaction entre le simulateur de vol et l'interface du Magicien d'Oz pour sortir le pilote de sa persévérance. Ici, l'idée est de faire comprendre que sa décision de se poser est dangereuse et contraire aux procédures en lui envoyant à la place du H.S.I. un premier message : " *Atterrissage impossible* ".



FIG. 7.6: Première contre-mesure cognitive sur le H.S.I.

Ensuite, l'objectif est d'orienter l'attention vers l'écran central (en fait, le cadran **Onera Messenger**) à l'aide du message " *Regarder l'écran central* " (c.f. 7.7) où lui est proposée une résolution possible du conflit (c.f. 7.8).



FIG. 7.7: Deuxième contre-mesure cognitive sur le H.S.I.

L'écran central (c.f. figure 7.8) a pour but d'expliquer la situation ("*Visibilité dégradée, atterrissage impossible*") et annonce un élément de solution que le pilote est libre de suivre ou non ("*Retour Blagnac*").



FIG. 7.8: Résolution du conflit sur l'**Onera Messenger**

7.4.2 Contre-mesures pour le scénario 3

Dans ce scénario, il y a deux hypothèses :

- le pilote a diagnostiqué la panne moteur gauche mais cherche à poursuivre la mission ;
- le pilote, concentré à garder son cap malgré le brouillard, persévère sur sa tâche de surveillance du H.S.I. au détriment de la supervision des autres paramètres et ne s'aperçoit pas de la panne moteur gauche.

Quoi qu'il en soit, pour assister le pilote et l'amener à se désengager de sa persévération, les contre-mesures consistent à afficher successivement à la place du H.S.I :

- le message " *Panne moteur gauche* " ;
- le message " *Atterrir d'urgence* ".

Ensuite, l'envoi d'un message " *Atterrir sur Francazal, Suivre cap 130* " sur l'**Onera Messenger** permet d'aider le pilote à se diriger vers l'aérodrome de secours le plus proche.

7.5 Déroulement des expérimentations

Les expérimentations se déroulent en suivant systématiquement le même protocole et durent en moyenne une heure en comptant les différentes étapes : présentation du cadre des expérimentations, entraînement, présentation du scénario, vol, debriefing.

7.5.1 Accueil des pilotes

En début de séance, l'expérimentateur motive chaque sujet en expliquant qu'ils participent à une expérimentation dont l'enjeu est l'amélioration de la sécurité aérienne. En revanche, l'objectif réel de ces expérimentations - les contre-mesures - n'est pas dévoilé : il s'agit d'observer comment les pilotes vont se comporter et notamment d'évaluer si la brusque disparition de l'information ne va pas dégrader le pilotage en ayant un effet contraire sur leur activité. Chaque pilote apprend de l'expérimentateur que ces expériences ont pour objectif de récupérer des paramètres de vol lors des simulations et ce pour valider un algorithme de détection d'intentions de pilotage.

7.5.2 Entraînement

Le participant s'installe dans la cabine de pilotage (c.f. figure 7.5.2) et reçoit une formation pour piloter l'appareil. Il apprend les raccourcis claviers et les

boutons sur le joystick pour contrôler les différents paramètres de l'avion : régler les fréquences radio, abaisser les volets, modifier le pas de l'hélice... Le pilote effectue plusieurs tours d'essai, décollage, atterrissage, interception d'une balise VOR et NDB, etc.



FIG. 7.9: Le pilote est assis dans la cabine de pilotage, et la visualisation est projetée par un vidéoprojecteur sur un écran.

7.5.3 Présentation des scénarios et vol

Une fois le pilote mis en confiance avec le simulateur, l'expérimentateur dévoile le scénario de vol sur une carte, commente la navigation à réaliser et énonce la consigne suivante : " *Effectuez la tâche de navigation en volant comme s'il s'agissait de conditions réelles ; respectez les procédures aériennes, si vous avez une panne, ou si vous estimez que vous ne pouvez pas vous rendre à un des points tournants, vous pouvez demander un déroutement* ". Le sujet reçoit une carte et un stylo, et est libre de poser toutes les questions nécessaires à la compréhension du scénario. Ensuite l'expérimentateur fait répéter à haute voix au participant le scénario puis la consigne.

7.5.4 Debriefing

Après chaque simulation (durée moyenne environ 20 minutes), les pilotes sont interrogés sur leur vol et leurs impressions. L'expérimentateur explique

le principe des contre-mesures et de la persévération et pose une série de questions :

- “ Avez-vous été influencé par les contre-mesures ? ” ;
- “ Avez-vous été perturbé ou gêné par les contre-mesures ? ” ;
- “ Avez-vous connaissance ou une expérience personnelle du phénomène de persévération ? ”
- “ Que pensez-vous du principe des contre-mesures ? ”.

7.6 Résultats

Vingt-deux pilotes ont participé à cette campagne d’expérimentation, dont huit sont pilotes de l’armée de l’air et treize, pilotes privés. Un seul pilote, n’a que 5 heures de vol mais possède une expérience significative sur simulateur type Flightsimulator et a une connaissance théorique et pratique du vol aux instruments. Devant la difficulté de recruter des pilotes expérimentés pour nos expériences, nous ne pouvons constituer des groupes de gauchers et de droitiers ou d’hommes et de femmes : parmi les participants, nous ne comptons qu’un seul gaucher (pilote20) et une seule femme (pilote6). Le tableau suivant récapitule les données relatives à l’âge, au nombre d’heures de vol, à la latéralité et à la profession de chaque participant :

Pilote	Age	Heures de Vol	Latéralité	Profession
Pilote1	38	2500	Droitier	Pilote de l’armée
Pilote2	47	1000	Droitier	Enseignant Enac
Pilote3	25	95	Droitier	Etudiant Supaéro
Pilote4	22	75	Droitier	Etudiant Supaéro
Pilote5	38	3000	Droitier	Pilote de l’armée
Pilote6	24	700	Droitière	Etudiante Supaéro
Pilote7	25	1000	Droitier	Pilote de l’armée
Pilote8	42	300	Droitier	Chercheur Onera
Pilote9	25	50	Droitier	Etudiant Supaéro
Pilote10	23	60	Droitier	Etudiant Supaéro
Pilote11	25	250	Droitier	Etudiant Supaéro
Pilote12	38	3000	Droitier	Pilote de l’armée
Pilote13	36	3500	Droitier	Pilote de l’armée
Pilote14	38	3000	Droitier	Pilote de l’armée
Pilote15	35	2500	Droitier	Pilote de l’armée
Pilote16	25	50	Droitier	Etudiant Supaéro
Pilote17	25	115	Droitier	Etudiant Supaéro
Pilote18	22	60	Droitier	Etudiant en Commerce

Pilote	Age	Heures de Vol	Latéralité	Profession
Pilote19	25	50	Droitier	Etudiant Supaéro
Pilote20	22	5	Gaucher	Etudiant Supaéro
Pilote21	35	3500	Droitier	Pilote de l'armée
Pilote22	23	60	Droitier	Etudiant Supaéro

7.6.1 Résultats pour les scénarios 1 et 2 : "atterrissage impossible"

Dans ces deux scénarios, les pilotes avaient à faire face à la décision d'abandonner la mission (atterrissage à Francazal) et de retourner à Blagnac. Les deux scénarios ont été testés suivant les conditions expérimentales suivantes : scénarios 1 et 2 sans l'aide des contre-mesures *et* scénario 1 et 2 avec les contre-mesures.

Condition 1 : sans contre-mesures

7 pilotes ont testé les scénarios 1 ou 2 sans les contre-mesures (c.f. tableau suivant). Le terme "Circuits" correspond au nombre de tours de piste autour de Francazal (c'est-à-dire au nombre de fois où le pilote persévère) avant que le pilote s'écrase ou se pose.

Pilote	Scénario	Circuits	Résultats
Pilote1	2	3	crash
Pilote2	1	3	crash
Pilote3	1	1	atterrissage chanceux
Pilote4	1	1	crash
Pilote5	2	2	atterrissage chanceux
Pilote6	1	2	crash
Pilote7	1	1	retour Blagnac

Les résultats montrent l'efficacité des deux scénarios à faire persévérer les participants puisque sur les sept pilotes qui ont volé dans la condition sans contre-mesures, six n'ont pas pris la décision adéquate (retour à Blagnac) et se sont entêtés à tenter un atterrissage sur Francazal. Parmi ces derniers, quatre d'entre eux se sont écrasés, et les trois autres ont réussi un "atterrissage chanceux", c'est-à-dire que pendant qu'ils tournaient autour de Francazal, la piste leur est miraculeusement apparue entre deux bancs de nuages et ils ont réussi à se poser tant bien que mal (souvent en abîmant l'appareil). Lors du débriefing, tous ont admis avoir pris une décision mauvaise et dangereuse.

Pourtant, un pilote (Pilote7) a correctement respecté les procédures ce qui montre qu'il était possible de se sortir de cette situation.

Condition 2 : avec contre-mesures

13 pilotes ont testé les scénarios 1 ou 2 avec les contre-mesures (c.f. tableau suivant). "Circuits" correspond au nombre de circuits réalisés par le pilote autour de Francazal avant l'envoi de contre-mesures par le magicien d'Oz.

Pilote	Scénario	Circuits	Résultats
Pilote8	1	3	crash à Francazal contre-mesures inefficaces
Pilote9	1	2	retour à Blagnac
Pilote10	1	2	retour à Blagnac
Pilote11	1	2	retour à Blagnac
Pilote12	2	3	retour à Blagnac
Pilote13	2	2	retour à Blagnac
Pilote14	2	2	retour à Blagnac
Pilote15	2	2	retour à Blagnac
Pilote16	1	2	atterrissage à Francazal contre-mesures inefficaces
Pilote17	1	2	retour à Blagnac
Pilote18	2	2	retour à Blagnac
Pilote19	1	5	crash à Francazal contre-mesures inefficaces
Pilote20	2	2	retour à Blagnac

Les résultats montrent l'efficacité des contre-mesures pour sortir les pilotes de leur persévération puisque 10 pilotes sur 13 ont changé leur décision pour atterrir en toute sécurité à Blagnac. Les pilotes, lors du debriefing, ont également tous confirmé que ce sont les contre-mesures qui les ont fait changer d'avis.

La figure 7.10 retrace un vol caractéristique de ces expérimentations dans la condition avec contre-mesures : le pilote (Pilote15) décolle de Blagnac, puis suit de manière adéquate sa navigation (trajectoire bleue) en allant respectivement sur les balises VOR 117.70 (représenté par le numéro 1), NDB 415 (numéro 2) puis NDB 423 (numéro 3). À partir de ce moment là, le pilote devrait décider de se détourner vers Blagnac, pourtant il cherche à localiser Francazal et commence à persévérer (trajectoire en rouge) en s'aidant des balises situées à proximité du terrain. Il fait un premier passage sur le terrain (numéro 4) puis retourne sur la NDB 415 (numéro 5) pour se rediriger à nouveau sur le terrain : à ce moment là l'expérimentateur envoie une contre-mesure (numéro 6) et le pilote change son cap pour rejoindre Blagnac (trajectoire en doré).

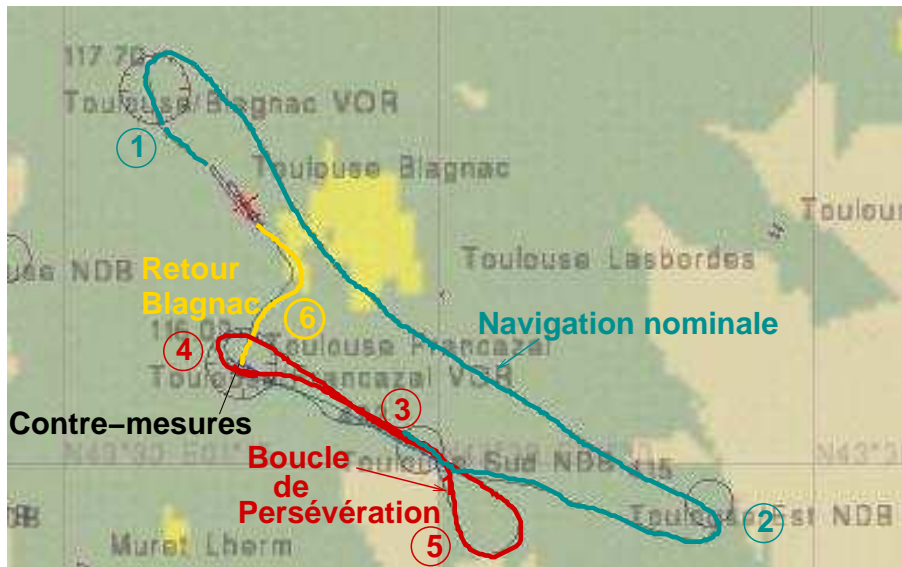


FIG. 7.10: Cette figure représente la trajectoire du Pilote15 obtenue avec le logiciel Atlas

De l'ensemble des debriefing, il ressort que la disparition momentanée du H.S.I. ne leur a pas causé de stress, puisque systématiquement, dès que les contre-mesures sont envoyées dans le cockpit, on observe que les pilotes avant toute chose reprennent de l'altitude, pour prendre du recul et analyser la situation, ensuite ils exécutent les mesures nécessaires pour se rendre à Blagnac.

Les résultats avec le pilote19 suggèrent que plus un pilote persévère depuis longtemps, plus il est difficile de l'en sortir. Le pilote a annoncé lors du debriefing qu'il était tellement stressé après ces 5 tours qu'il n'a noté à aucun moment l'envoi de contre-mesures.

Enfin, les résultats particuliers pour les pilotes 8 et 16 nous ont été en partie expliqués pendant la séance de debriefing : le pilote16 a déclaré qu'il savait que son comportement était erroné mais qu'il voulait tester les limites du simulateur, en revanche le pilote 8, bien qu'ayant reconnu avoir perçu les contre-mesures, ne nous a pas fourni de réelles justification de son comportement.

7.6.2 Résultats pour le scénario 3 : "la panne"

Seulement deux pilotes (Pilote21 et Pilote22) ont testé ce scénario, chacun dans une condition : le Pilote21 avec contre-mesures, le Pilote22 sans contre-mesures. Conformément à nos hypothèses, les deux pilotes, une fois dans le brouillard, se sont focalisés sur le H.S.I. pour réussir à maintenir leur cap. Trop

concentrés, aucun des deux ne s'est aperçu de la chute de régime moteur. Le pilote²¹ informé par les contre-mesures envoyées par l'intermédiaire du H.S.I. a pris la décision de se poser immédiatement sur le terrain le plus proche. En revanche le pilote²² a poursuivi sa route sans diagnostiquer le problème pour s'écraser après une tentative de se poser dans un champ.

7.6.3 Remarques sur les contre-mesures

Sur les 14 pilotes qui ont reçu des contre-mesures, 13 d'entre eux ont eu un retrait d'information par clignotement d'un cadran et un seul a eu une disparition totale d'un cadran. Plusieurs types de messages d'aide ont été proposés et testés.

Contre-mesures par clignotement

Les contre-mesures par clignotement ont été réglées de la manière suivante : l'instrument clignote 3 fois en disparaissant pendant 0.3 secondes et en apparaissant pendant 0.3 secondes. C'est durant la période de disparition que le pilote peut lire le message envoyé par le magicien d'Oz. Quatre types de messages ont été testés et envoyés dans la cabine de pilotage alors que le pilote était à une trentaine de mètres de la piste, train sorti :

- " *Atterrissage impossible* " ;
- " *N'atterrissez pas* " ;
- " *Retour Blagnac* " ;
- " *Remise des gaz* " .

Les deux premiers types de message ont été testés avec 5 pilotes et se sont montrés inefficaces pour les faire changer d'avis. C'est uniquement en envoyant le message " *Retour Blagnac* " que ces pilotes ont cessé de tourner autour du terrain et se sont redirigés vers Toulouse-Blagnac. Il semble donc que les messages de formes négatives (" *N'atterrissez pas* ", " *Atterrissage impossible* ") ne soient pas traités par les pilotes lorsqu'ils persévèrent. Lors du debriefing, ces cinq pilotes ont déclaré avoir pris ces informations pour des bugs du simulateur, ou bien pire, ne les ont même pas remarquées, alors qu'un message comme " *Retour Blagnac* " envoyé quelques secondes après, au même endroit, avait alerté leur attention. Une explication possible nous a été fournie par un pilote expérimenté : " *quand on est perdu, on a besoin des solutions positives comme Aller à Blagnac mais surtout pas des non-solutions, ça ne sert à rien, c'est logique* ". Cela apporte des éléments de réponses pour comprendre pourquoi les alarmes sonores ne sont pas prises en compte par les pilotes lorsqu'ils persévèrent : une alarme qui retentit dans le cockpit n'amène après tout pas de solution en soi pour aider les pilotes à résoudre un conflit.

Le message “ *Remise des gaz* ”, testé avec seulement deux pilotes a eu un effet quasi immédiat sur le comportement des pilotes. Ce type de message impératif est en fait très pertinent dans la situation à laquelle ils ont fait face : c’est un message classiquement utilisé pour faire interrompre un atterrissage.

Contre-mesures par disparition totale d’un cadran

Ce cas particulier de contre-mesure est intéressant, bien que testé une seule fois : pour rompre le mécanisme de persévération du Pilote20, nous avons enlevé pendant 30 secondes son H.S.I. ; celui-ci, privé de ces indications n’avait plus la possibilité de localiser l’aérodrome et a réagi en prenant de l’altitude pour calculer une route pour sortir du brouillard et trouver un aérodrome. Au debriefing, le pilote a expliqué qu’il a interprété la disparition du H.S.I. comme une panne, et qu’il l’a traitée en tant que telle : “ *je ne pouvais plus trouver Franczal sans mon H.S.I. en panne , et puis de toute façon c’était trop dangereux avec le brouillard, alors je suis remonté pour essayer de trouver une solution...* ”

7.6.4 Contre-mesures et alarmes

Durant les expérimentations, 8 pilotes ont fait au moins une erreur (sélection d’une mauvaise fréquence radio, mauvaise altitude, trains d’atterrissages non rentrés...) Pour les alerter, le magicien d’Oz a envoyé des contre-mesures sur le cadran couramment surveillé par les pilotes.

Le tableau suivant résume le type d’erreur commis par le pilote (ex : oubli de rentrer le train), le message d’alarme (train non rentré) et le cadran à la place duquel il a été envoyé.

Pilote	Erreur	Message	Cadran
Pilote9	Oubli de rentrer le train	Train non rentré	H.S.I.
Pilote16	Oubli de rentrer le train	Train non rentré	Altimètre
Pilote10	Oubli de rentrer le train	Train non rentré	Altimètre
Pilote8	Oubli de rentrer le train	Train non rentré	Altimètre
Pilote8	Oubli de rentrer les volets	Volets non rentrés	Altimètre
Pilote12	Oubli de rentrer les volets	Volets non rentrés	Altimètre
Pilote13	Oubli de rentrer les volets	Volets non rentrés	Altimètre
Pilote13	Mauvaise fréquence	415Hz mauvaise fréquence	H.S.I.
Pilote18	Oubli de rentrer le train	Train non rentré	Altimètre
Pilote20	Altitude non respectée	Altitude 2000 pieds	H.S.I.

Ces contre-mesures se sont révélées efficaces puisque tous les pilotes ont exécuté les manœuvres pour corriger leurs erreurs, et sans que l'on observe de gêne dans leur activité. En moyenne, il a fallu envoyer deux séries de trois clignotements pour obtenir la prise en compte du message. Au débriefing, cependant, aucun des pilotes interrogés n'a annoncé s'être souvenu d'avoir été aidé par les contre-mesures pour corriger ses erreurs, ce qui est contradictoire avec les résultats objectifs. Toujours est-il que cela laisse supposer que les contre-mesures ne sont pas trop intrusives dans l'activité de pilotage et ne perturbent pas les pilotes.

7.6.5 Point de vue des pilotes

L'ensemble des pilotes qui ont été assistés par les contre-mesures ont confirmé avoir trouvé le principe du retrait d'information très pertinent pour casser le mécanisme de persévération dans lequel ils étaient, ou pour corriger leur erreur de pilotage. Aucun d'entre eux n'a estimé avoir été gêné par les contre-mesures, bien au contraire. Certains pilotes n'ont pas eu de contre-mesures, que ce soit pour empêcher la persévération ou pour les alerter d'une erreur, pourtant après le vol nous leur avons expliqué le principe et fait une démonstration. Bien qu'il ne l'aient pas expérimentée, tous ont pensé que cela semblait une solution adaptée pour assister l'activité de pilotage.

Les pilotes de l'armée ont trouvé particulièrement intéressant le principe d'alarmes visuelles, beaucoup moins stressantes selon eux que les alarmes sonores qui demandent dans un premier temps de localiser la source sonore puis dans un deuxième temps de faire un diagnostic de la situation tout en continuant de piloter. Ainsi :

- le Pilote7 : *“ Dans le cockpit, il y a beaucoup de bruits, le bruit des moteurs, les alarmes sonnent, on a du mal à les localiser, parfois les sons sont agressifs et ça nous conduit à les négliger, tandis que là, on a non seulement une alarme directement dans notre champ visuel mais aussi un message de diagnostic de la situation. ”*
- le Pilote12 : *“ Je préfère une alarme visuelle à une alarme sonore, le clignotement du H.S.I., c'est bien, ça choque ... mais faut voir si ça pourrait pas être dangereux.”*
- le Pilote13 : *“ C'est [les contre-mesures] placé au bon endroit, là où c'est sa fonction principale, et puis c'est ce qu'aurait fait un copilote ”.*
- le Pilote14 : *“ Le clignotement c'est favorable, on est attiré par le mouvement, par exemple l'alarme pour les volets non rentrés dans notre avion, c'est quelque chose d'allumé qui n'attire pas le regard, les pilotes peuvent le négliger. ”*
- le Pilote15 : *“ Je me suis senti violé par les contre-mesures, c'était l'homme qui prend la décision et non le système, même si c'est judicieux, mais c'est vrai que ça m'a aidé”.*

- le Pilote21 : *“C’est alertant.. là où le pilote regarde, c’est mieux que dans un coin”*.

7.6.6 Détection de conflit

Les trois scénarios reposent sur une mise en conflit effective des pilotes destinée à perturber leur activité. Ces conflits peuvent être identifiés, en appliquant le principe de l’algorithme de détection (c.f. partie 4.3.3). Nous nous proposons d’illustrer la modélisation du conflit à partir des paramètres de vol d’un pilote (Pilote6) puis ensuite d’élargir la discussion sur la nature psychologique des conflits de ces scénarios.

Connaissances du Pilote6

Au temps 1500, le Pilote6 est engagé dans le but 5 qui consiste à atterrir à Francazal :

`pa_goal(goal(5),<Landing_francazal>,<1500,t1>)`

Pour réaliser ce but, le Pilote6 doit vérifier l’ensemble des propriétés suivantes durant le temps de son engagement :

`pa_plan(goal(5),<VOR_frequency(116),
VOR_heading_deflection(true),gear_down(true),
flaps_down(2),visibility(true)>,<1500,t1>)`

ce qui se traduit par : *sa fréquence VOR est réglée sur 116MHz, sa route est cohérente avec la VOR, son train est sorti, il a 2 crans de volets, sa visibilité est bonne.*

Activité observée du Pilote6

Au temps 1500, l’activité réelle du Pilote6 est :

`pa_obs(<VOR_frequency(116),VOR_heading_deflection(true),gear_down(true),
flaps_down(3),visibility(false)>,<1500,1500>)`

c’est-à-dire qu’au temps 1500, le Pilote6 a sélectionné la bonne fréquence radio, sa route est correcte, son train est sorti, mais il a trois crans de volets et sa visibilité est mauvaise.

Détection des incohérences du Pilote6

Au temps 1500, le prédicat `not_hold_together` détecte deux ensembles incohérents, l’un relatif aux volets, l’autre à la visibilité :

```
not_hold_together(pa_plan(5,flaps_down(2)),
pa_obs(flaps_down(3)),<1500,1500>)
not_hold_together(pa_plan(5,visibility(true)),
pa_obs(visibility(false)),<1500,1500>)
```

Détection du conflit

On examine les AP_cruciales au temps t :

```
pa_crucial(goal(5),<visibility(true)>,<1500,t1>)
```

Durant l'intervalle de temps $[1500,t1]$ pour le point tournant 5, il est crucial de vérifier la propriété relative à la visibilité :

Le prédicat matters détecte que l'un des deux ensembles d'AP est conflictuel :

```
matters(pa_plan(goal(5),visibility(true)), pa_obs(visibility(false),<1500,1500>)
```

Il reste au Pilote⁶ à résoudre le choix suivant : atterrir à Franczal conformément au plan de vol mais risquer de s'écraser (et c'est ce qui s'est passé dans nos expérimentations) ou bien se dérouter vers un autre aérodrome.

7.7 Discussion

7.7.1 Commentaires sur les conflits

Dans les trois scénarios, c'est le conflit qui est à l'origine de la dégradation de l'activité de pilotage et il a conduit 21 participants sur 22 à persévérer. Pourtant, plus que le conflit logique, fait d'incohérence et de conséquences, c'est sa véritable nature psychologique qui fait persévérer les pilotes. On se rapproche du conflit Lewinien où chaque élément possible de résolution est un " champ de force attractif ou répulsif " [Lewin *et al.*, 1939 ; Castelfranchi, 2000 ; Le Marc, 1999] qui agit sur la psychologie de l'agent.

En effet, à travers ces conflits, nous avons joué sur plusieurs éléments :

- dans les scénarios 1 et 2, l'atterrissage, au vu des procédures aériennes, est formellement interdit, pourtant, pour attirer les pilotes dans un atterrissage, l'aérodrome, bien que noyé dans une nappe opaque, se découvre à certains moments :
- dans le scénario 2, la piste est visible de loin, mais à mesure que le pilote s'en approche, elle disparaît dans le brouillard, toujours est-il que le pilote l'a vue à un moment ou un autre, ce qui laisse penser qu'en retentant une nouvelle approche, il pourra s'y poser ;

- dans le scénario 1, juste avant de s'enfoncer dans la nappe de brouillard, le pilote a tout le loisir d'observer parfaitement la piste Toulouse-Francazal, et ainsi quand il sort de cette nappe, elle est à nouveau visible mais il est trop tard pour se poser, toujours est-il que cela lui donne matière à penser qu'il peut toucher à son but final.
- la prise de décision d'interrompre ou non la mission (autrement dit la résolution du conflit) est difficile pour les pilotes, car bien que les objectifs ne soient pas atteignables au vu des conditions de vol, ils semblent tout de mêmes " faisables " compte tenu des moyens dont ils disposent avec leur appareil :
 - dans les scénarios 1 et 2, la piste Toulouse-Francazal bien qu'invisible, est tout de même localisable à l'aide de moyens de radionavigation puisque ce terrain est équipé d'une VOR². Une fois plongés dans le brouillard, les pilotes savent qu'ils disposent d'un moyen pour retrouver la piste s'ils décident de persévérer pour atterrir. Le fait d'apporter des moyens supplémentaires qui vont rendre plus " faisable " l'atterrissage est destiné à rendre la résolution du conflit plus difficile et à conforter la décision de persévérer dans cette tâche.
 - dans le scénario 3, continuer sur un seul moteur en dépit de la panne semble faisable mais, étant donné l'effort demandé pour piloter un avion devenu instable et par une visibilité dégradée, il est normalement préférable d'interrompre la mission et de se poser sur l'aérodrome le plus proche. Cependant la limite entre ce qui semble apparemment faisable et infaisable étant faible, les pilotes sont probablement tentés de continuer la mission, et conformément aux théories de l'engagement ("technique du doigt dans l'engrenage" [Beauvois et Joule, 1999], c.f. partie 3.2.1), s'ils décident de poursuivre la mission, ils sont quasiment condamnés à persévérer.
- enfin, pour ces expérimentations, (c.f. section 7.5) il est explicitement demandé aux pilotes de réaliser la tâche de navigation, mais seulement dans la mesure des conditions de vol. Cependant, comme l'ont montré les expériences de Milgram [Milgram, 1973], la soumission du sujet à son expérimentateur est telle qu'elle le conduit à faire tout ce qui lui a été ordonné de manière stricte même si cela va à l'encontre de son sens moral. Le conflit pour le pilote ne se résume pas à " dois-je continuer ou bien me dérouter " mais " dois-je continuer comme me l'a demandé l'expérimentateur et ne pas respecter les procédures ou bien me dérouter conformément aux procédures mais ne pas faire ce qui m'a initialement été demandé ? "

²Il faut noter que ce système de radionavigation permet de situer seulement la piste mais pas d'atterrir aux instruments.

7.7.2 Critique des expérimentations

Les expérimentations nous ont permis de montrer que, quelles que soient la culture (civile, militaire) et l'expérience des sujets, les scénarios ont conduit les pilotes à persévérer et les contre-mesures ont été dans l'ensemble efficaces. Pourtant, compte tenu du protocole expérimental et du faible nombre de pilotes, il nous est difficile de proposer des explications plus précises sur le comportement des pilotes face au conflit et sur l'effet des contre-mesures.

Le conflit

Les conflits dans nos expériences, comme nous l'avons vu dans la section 7.7.1, ont des composantes structurelles et psychologiques.

Il est par conséquent délicat de tirer des conclusions sur les effets réels de chacun de ces composants sur les décisions des pilotes. Il serait souhaitable de réaliser des expérimentations complémentaires, en faisant varier un à un les facteurs du conflit pour évaluer leur impact sur les pilotes, c'est-à-dire en jouant tour à tour sur :

- la nature de l'incohérence (panne, problème météorologique...) et ses conséquences pour la poursuite de la mission ;
- le moment où se produit l'incohérence (début ou fin de vol) ;
- la nature de la relation entre l'expérimentateur et le pilote (hiérarchique, amicale ...) ;
- les différentes possibilités de résolution et les champs de force (attractif ou répulsif) qu'elles exercent sur la psychologie des agents.

Contre-mesures

Le principe des contre-mesures dans son ensemble semble fonctionner, mais nous ne pouvons déterminer avec exactitude leurs effets réels sur la cognition des pilotes car, pour chaque pilote :

- le mécanisme n'était pas le même. Un seul pilote a eu un véritable retrait d'information, alors que les autres ont eu un retrait du HSI suivi d'un message ;
- les messages n'étaient pas les mêmes ;
- la fonction n'était pas la même. Certaines contre-mesures ont été envoyées pour résoudre un conflit et empêcher la persévération, d'autres avaient pour but de corriger une erreur de pilotage ;
- le moment d'envoi n'était pas le même. Certains pilotes ont eu des contre-mesures après successivement 2, 3 ou 5 tours de terrains.

Cette approche empirique vient du fait que ce type de contre-mesure n'a jamais été testé auparavant et que nous ignorions tout de la réaction des pilotes. Par exemple, nous ne nous attendions pas à ce que les pilotes ne perçoivent pas les messages négatifs. Ainsi de nombreuses questions doivent être étudiées :

- le retrait d'information est-il suffisant ou est-il nécessaire d'adjoindre un message ?
- les contre-mesures jouent-elles sur des processus conscients ou automatiques ?
- quelles sont les limites d'emploi et d'efficacité des contre-mesures ?

Ces simulations constituent donc des manipulations préliminaires et de nombreuses expérimentations plus formelles sont à conduire pour valider et mieux comprendre le principes des contre-mesures. L'idée est de reproduire ces expériences mais en divisant en quatre groupes la population de pilotes :

- groupe 1 : contre-mesures avec retrait d'information ;
- groupe 2 : retrait d'information, suivi d'un message pertinent ;
- groupe 3 : retrait d'information, suivi d'un message non pertinent ;
- groupe 4 : sans contre-mesure.

7.8 Ghost : vers un nouveau système d'aide au pilotage

Les résultats de ces expériences permettent de dresser un premier bilan sur les principes mis en œuvre dans Ghost.

L'objet de Ghost n'est pas de réaliser une assistance au pilotage au sens classique tel que définie dans le programme du " Copilote électronique " [Amalberti et Deblon, 1992]. Si cette perspective est dans l'absolu idéale dans le sens où elle cherche à réaliser une modélisation cognitive de l'activité de pilotage et à intégrer l'ensemble des concepts de l'ergonomie cognitive et de la sécurité écologique, sa mise en œuvre pratique est réduite compte tenu de la difficulté à envisager et représenter toutes les connaissances nécessaires pour intégrer ces concepts.

Le système Ghost repose sur l'idée d'un " filet de sauvegarde " [Wioland, 1997], où un automate surveille l'activité de pilotage et envoie des contre-mesures pour empêcher les mécanismes de persévération.

Le cadre théorique de Ghost est donc celui du suivi de situation (c.f. section 1.3.3) mais l'originalité de son approche semble permettre d'en éviter certains écueils liés à la modélisation de notions complexes telle que l'intention des pilotes (c.f. [Demolombe et Hamon, 2002]) ou au problème de la variabilité inter-individuelle.

7.8.1 La détection de conflit

Tout au long de ce manuscrit nous avons appuyé l'idée de prédire la dégradation de l'activité des pilotes à partir de la détection des conflits dans leur activité. Ce principe semble pertinent pour l'étude de la sécurité aérienne, et tient des caractéristiques psychologiques et structurelles du conflit :

- ses aspects psychologiques permettent de déterminer que son apparition engendre des comportements incohérents et ce, quel que soit le niveau d'expertise des pilotes. Nos expériences l'ont montré mais également les travaux [Rhoda et Pawlak, 1999 ; BEA, 2000 ; Wanner et Wanner, 1999] et les accidents [Grau, 1994 ; Grau, 1995] que nous avons examinés dans le chapitre 3 ;
- ses aspects structurels, tels que nous les avons définis, font qu'il est possible de le détecter en étudiant la cohérence des buts courants des pilotes. De ce fait la modélisation des conflits permet :
- de représenter dans les modèles d'activité de pilotage uniquement ce qui est important pour la sécurité, pour chaque phase de vol ;
- d'éviter les problèmes liés à la prise en compte de variabilité des pilotes (expertise...);
- de prévoir que la situation peut se dégrader d'un point de vue psychologique à partir de l'analyse des buts sans faire intervenir des états mentaux inobservables comme l'intention ou les croyances des pilotes.

7.8.2 Les contre-mesures

Les contre-mesures associées à la détection de conflit apportent également des éléments pertinents pour la sécurité aérienne.

En premier lieu, le but des contre-mesures n'est pas de prévenir les pilotes dès qu'un écart aux procédures de vol est détecté. En effet, les théories sur le compromis cognitif [Grau et Hourlier, 2000] montrent que les opérateurs commettent des erreurs mais en récupèrent la plupart. Ainsi la gestion des erreurs est laissée aux pilotes [Rizzo *et al.*, 1987]. Les contre-mesures sont envoyées au pilote, en dernier recours, lorsque :

- une situation conflictuelle a été détectée ;
- les alarmes n'ont pas infléchi le comportement des pilotes.

Ensuite, nos expériences ont montré que les contre-mesures sont objectivement peu intrusives : leur rôle est de prévenir et de conseiller le pilote. Celles-ci fonctionnent sur un principe que l'on peut qualifier de "tape sur l'épaule"³, de la même manière qu'un copilote prévient son commandant de bord lorsqu'il

³pour bien comprendre ce principe de "tape sur l'épaule", on peut se référer à la conduite automobile lorsque le passager, ne comprenant pas la direction suivie par le conducteur, l'in-

ne comprend pas les actions de ce dernier. Le système ne fait que formuler des avis : ainsi s'il se trompe (la situation n'est pas reconnue comme conflictuelle par l'équipage), on peut espérer que les contre-mesures ne perturbent pas trop l'activité des pilotes.

Enfin, un des avantages majeurs des contre-mesures est qu'elles ne nécessitent pas l'introduction d'une nouvelle interface : elles utilisent les écrans déjà présents dans le cockpit. Ce principe permet d'éviter :

- de rajouter une interface dans les cockpits souvent surchargés ;
- aux pilotes de penser à surveiller un écran de dialogue supplémentaire.

7.9 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des expérimentations dont l'objectif est l'étude du comportement de persévération dans une tâche de pilotage. Il s'agit d'une étude en laboratoire et en ce sens ces expérimentations sont critiquables :

- les pilotes n'étaient pas experts du Cessna 331 ;
- son pilotage utilisait des moyens non conventionnels (raccourcis claviers, joystick) ;
- l'interaction avec le contrôle aérien était réduit à sa plus simple expression ;
- les vols étaient simulés.

Pourtant ces expérimentations ont été l'occasion d'éprouver le principe des contre-mesures auprès de pilotes privés et professionnels, de conforter nos hypothèses de départ sur les conflits et la persévération mais aussi de dégager des éléments nouveaux.

Tout d'abord, bien que ces situations expérimentales fussent en simulateur de vol, 21 pilotes sur 22 ont été amenés à réellement persévérer quels que fussent les scénarios, comme en témoignent les comportements de certains pilotes incapables de comprendre une information négative qui remettaient en cause leur raisonnement, de changer de stratégie ou de surveiller des cadrans essentiels dans le cockpit pour diagnostiquer une panne. Ces caractéristiques sont symptomatiques du syndrome de persévération (c.f. chapitre 3).

Ensuite, nous avons pu vérifier le bien-fondé de nos hypothèses sur les contre-mesures :

terroge sur ses décisions. Le dialogue suivant illustre ce type de situation.

- le passager : *“ Tu es sûr que ce n'est pas à gauche pour aller à l'université ? ”* ;
- le conducteur (possibilité 1) : *“ Ah si, oui, c'est vrai, je pensais à autre chose. ”*
- le conducteur (possibilité 2) : *“ Non, il y a des travaux, on est obligé de passer par là. ”*

- objectivement leur envoi a sorti les pilotes de leur persévération ;
- subjectivement les participants ont tous reconnu l'aide apportée dans leur activité de pilotage ;
- ces contre-mesures se sont révélées être non-intrusives, c'est-à-dire qu'aucun des participants n'a déclaré avoir été gêné par la brusque disparition d'information dans le cockpit. Comme l'a précisé un pilote, ces contre-mesures ont fait " *ce qu'aurait fait un copilote* " : surveiller la cohérence de son activité, alerter et proposer des solutions.

Par ailleurs, il s'est avéré que les messages à caractère négatif (ex : "*N'atterrissez pas*") ont été beaucoup moins efficaces que les messages positifs (ex : "*Remise des gaz*") pour sortir les pilotes de leur persévération.

Enfin nous avons pu corriger certaines erreurs commises par les pilotes en envoyant des contre-mesures sur les cadrans qu'ils surveillaient : en suppléant le rôle des alarmes classiques nous avons empêché la dégradation de leur activité.

Les idées mises en place dans le système Ghost (détection de conflit, contre-mesures cognitives) semblent apporter des solutions originales et écologiques pour aider les pilotes lorsqu'ils persévèrent. Ces résultats motivent nos recherches actuelles sur l'intégration d'un système embarqué destiné à aider les équipages d'avion de ligne lorsqu'ils font face à des situations conflictuelles.

Conclusion

Tout au long de ce manuscrit, nous nous sommes efforcés de répondre à une question : le conflit est-il un concept pertinent pour la sécurité aérienne ? Les interrogations suscitées par le problème posé nous ont conduit à apporter une contribution théorique et pratique sur ce concept. Théorique, tout d'abord, car nous avons cherché à comprendre les enjeux structurels et psychologiques du conflit pour le définir. Théorique également lorsque nous cherchons à expliquer le lien entre la structure du conflit et la persévération. Pratique enfin, car nous avons élaboré de premiers outils pour modéliser le conflit, développé un environnement - Ghost - pour étudier le conflit et la persévération mais aussi proposé des solutions - les contre-mesures cognitives - pour lutter contre ce comportement émergent.

Contributions à la notion de conflit

Conflit et erreur humaine

La revue d'accidents aéronautiques tant civils que militaires a montré que l'apparition de conflits dans la gestion du vol est un indicateur pertinent pour évaluer l'état des interactions entre l'équipage et son environnement. Dans ces événements aériens, le conflit s'est comporté comme un précurseur remarquable de dégradation de la performance des équipages dans le sens où il a amené les pilotes à commettre des erreurs (non respect des procédures aériennes, relâchement de la surveillance des paramètres de vol, gestion erronée des ressources du cockpit).

Vers une définition du conflit

De manière à comprendre les mécanismes du conflit sur l'activité pilotage, l'idée a été de se doter d'outils théoriques et pratiques pour le modéliser. En préambule à la mise en œuvre d'un tel modèle, les premières recherches ont consisté à étudier la notion de conflit.

Bien que le concept de conflit ne soit pas défini de manière univoque dans la littérature scientifique et ce quelle que soit la discipline, nous avons proposé une relecture possible de l'ensemble de ces acceptions, en considérant qu'elles recouvrent toutes l'idée générique d'une impossibilité pour un agent ou un groupe d'agents d'atteindre un but important.

L'analyse d'accidents aéronautiques a par ailleurs permis de confronter cette vision, puisque le conflit à l'origine des catastrophes s'est produit car :

- les équipages étaient engagés dans un but important (du point de vue de la phase de vol ou de la sécurité) ;
- ce but ne pouvait être atteint à cause d'incohérences (météo, panne...)

À partir de ces réflexions, nous avons proposé de définir le conflit comme une situation où un ou plusieurs agents ne peuvent atteindre un but important. De même, nous avons considéré qu'un agent *A1* est en conflit avec un agent *A2* si au moins un but de *A2* empêche l'agent *A1* d'atteindre son propre but.

Modélisation des conflits

Partant de ce point de vue, nous avons ensuite cherché à modéliser les conflits. Pour représenter les connaissances en jeu, nous avons introduit la notion générique d'attitude propositionnelle. L'activité des pilotes est exprimée par des *AP_but*, des *AP_plan* et des *AP_cruciale*, connaissances qui représentent respectivement les différents buts à atteindre lors du vol, les procédures correspondantes pour les atteindre et les contraintes à vérifier pour assurer la sécurité du vol. Une quatrième catégorie d'*AP*, les *AP_observation*, permet de rendre compte de l'activité réelle des pilotes. La détection de conflit est mise en œuvre à travers deux étapes :

- en identifiant les incohérences dans les ensembles d'*AP_but*, d'*AP_plan* et d'*AP_observation* ;
- en analysant si ces ensembles incohérents possèdent des propriétés communes avec des *AP_cruciale*.

Premières expérimentations

Pour éprouver la capacité de notre modèle à rendre compte des conflits dans la gestion du vol, une expérience a été conduite avec dix pilotes dans un environnement de simulation aéronautique (LIPS). Les pilotes avaient à réaliser une tâche de navigation dont la réussite dépendait d'une gestion adaptée du carburant dans la conduite de leur mission.

Les résultats de ces expérimentations semblent aller dans le sens d'une validation de nos hypothèses puisque deux conflits ont été détectés par les moyens

informatiques mis en œuvre et ont été ressentis en tant que tels par les pilotes : ces conflits se sont produits alors que les pilotes cherchaient à atteindre un but qu'ils ne pouvaient ou n'arrivaient pas à atteindre, et ces buts de surcroît étaient cruciaux puisqu'ils consistaient en un ravitaillement, nécessaire pour finir la mission. Les deux pilotes ont été confrontés à un conflit de représentation puisque leur interprétation du monde était incohérente avec la réalité.

Ensuite, nous avons observé que ces deux pilotes s'étaient enfermés dans un raisonnement erroné. Dans ces situations le conflit a été focalisateur d'attention : trop concentrés sur la résolution du problème (trouver le point tournant), aucun des pilotes n'a été capable de trouver l'information pertinente pourtant disponible dans le cockpit. Ces expériences ont permis de fournir des éléments pour comprendre comment le conflit pouvait dégrader la performance des pilotes en les conduisant à persévérer.

Contributions sur la notion de persévération

Sémiologie de la persévération

Dans le même esprit que pour notre étude sur le conflit, nous avons rapproché et tenté d'unifier les travaux sur la question de la persévération. La persévération est un phénomène que l'on retrouve dans la littérature scientifique mais dont la terminologie diffère selon les disciplines. Par exemple en ergonomie, on parle d'"erreur de fixation" ou d'"erreur diabolique", en sociologie et en neuropsychologie de "syndrome de persévération" et enfin les spécialistes de l'aviation emploient le terme de "fascination pour l'objectif". Si les appellations et les explications diffèrent, globalement une sémiologie peut être dégagée : la persévération est une focalisation exclusive du raisonnement et de l'attention sur la réalisation d'un but (même si celui-ci est dangereux). En nous inspirant des travaux en neuropsychologie et en particulier des travaux sur l'inhibition, nous avons proposé la définition suivante : la persévération désigne l'incapacité pour un agent d'inhiber un but et d'en engager un nouveau pour répondre de manière adaptée aux sollicitations de l'environnement.

Explications de la persévération

Les théories en psychologie et en ergonomie expliquent l'apparition de la persévération à partir du paradigme des ressources cognitives. C'est leur épuisement qui conduirait au déficit d'un processeur central, ou d'un système central exécutif, chargé entre autres de gérer l'attention consciente. Ce postulat explique ainsi pourquoi les opérateurs, lorsqu'ils persévèrent, sont incapables

d'orienter leur attention vers l'information pertinente qui les sortirait de leur obnubilation.

Les explications que nous fournissons, au vue des résultats de nos expérimentations et de la revue de la littérature récente en psychologie cognitive, sont autres.

Par exemple, dans nos expériences, il ne semble pas que les deux pilotes eussent été confrontés à un problème de surcharge cognitive tel que cela les eut empêchés de baisser la tête et de trouver l'information pertinente dans le cockpit. C'est plus vraisemblablement la peur de tomber en panne qui a fasciné les pilotes et les a conduits à vouloir se rendre sur ce qu'ils croyaient être les zones de ravitaillement. Enfin, les théories récentes contestent l'existence des systèmes postulés par la psychologie cognitive.

Notre hypothèse est que c'est l'apparition d'un stress provoqué par un événement particulier (conflit, dégradation de la météo, panne...) qui perturbe l'homéostasie du cerveau et amène le pilote à se focaliser excessivement sur la source de danger jusqu'à ce que le problème soit résolu. Nous étayons cette hypothèse sur la base de travaux en neuropsychologie et en physiologie qui ont montré que les effets du stress produisent certains comportements comme la persévération.

Contre-mesures cognitives

La persévération conduit l'opérateur à ignorer l'information pertinente qui l'entoure au profit de la réalisation de son objectif, et plonge le concepteur d'interface devant un paradoxe : comment espérer concevoir un mécanisme qui viendrait l'informer de son obnubilation ?

Dans l'idée de trouver une solution à ce problème, nous avons élaboré des contre-mesures qui reposent sur les résultats théoriques et empiriques suivants :

- les situations conflictuelles amènent les pilotes à persévérer ;
- l'ajout d'information, comme les alarmes sonores et visuelles, classiquement utilisées pour prévenir les pilotes, est souvent négligé lorsqu'ils persévèrent.

Conforté par des résultats en neuropsychologie de l'attention, un moyen pour contrer la persévération est de retirer de l'information sur l'interface du pilote. Ce retrait d'information est ciblé puisqu'il s'agit d'enlever les éléments de connaissances (ex : un cadran) qui fait persévérer à tort le pilote et qui concentre son attention au détriment de la surveillance de l'ensemble des paramètres vitaux. Cette information est ensuite remplacée par une autre qui doit aider le pilote à sortir de son obnubilation ou attirer son attention sur un autre paramètre vital.

Ghost : étude expérimentale de la persévération

Pour tester ces contre-mesures nous avons développé l'environnement expérimental Ghost. Il est constitué d'un simulateur de vol, d'un logiciel de suivi de route et d'une interface de magicien d'Oz. Le but est de disposer d'un environnement d'étude de la persévération : le simulateur de vol permet de mettre aux commandes des pilotes, l'interface du magicien d'Oz et Atlas sont destinées à créer des scénarios expérimentaux, à envoyer des perturbations aux pilotes pour les mettre en situation de persévération mais aussi à élaborer des contre-mesures pour les sortir de leur persévération.

Trois scénarios ont été élaborés et proposés aux 22 pilotes qui participaient aux expériences. Les pilotes étaient placés dans des situations conflictuelles, c'est-à-dire qu'au moins un but de ces scénarios était impossible à atteindre en raison d'une perturbation météorologique. L'intérêt de cette méthode est que la dégradation des conditions de visibilité oblige les pilotes à se focaliser sur certains cadrans, cadrans à partir desquels nous envoyons les contre-mesures.

Ces scénarios ont amené 22 pilotes sur 23 à persévérer ce qui permet d'aller dans le sens d'une confirmation de nos hypothèses sur le lien entre l'apparition du conflit et la persévération.

Les contre-mesures, exceptées les cas où elles présentaient des messages contenant une négation, se sont révélées efficaces pour sortir les pilotes de leur persévération (11 pilotes sur 14). Par ailleurs, certains sujets ont commis des erreurs de pilotage et nous avons utilisé le principe des contre-mesures pour les en alerter : tous les pilotes sans exception ont corrigé leurs erreurs sans toutefois avoir eu le souvenir d'avoir été aidé.

Perspectives

Introduction

Les travaux en cours se concentrent sur la réalisation d'un Ghost embarqué, c'est-à-dire d'un système d'assistance au pilotage fondé sur les principes étudiés au cours de cette thèse.

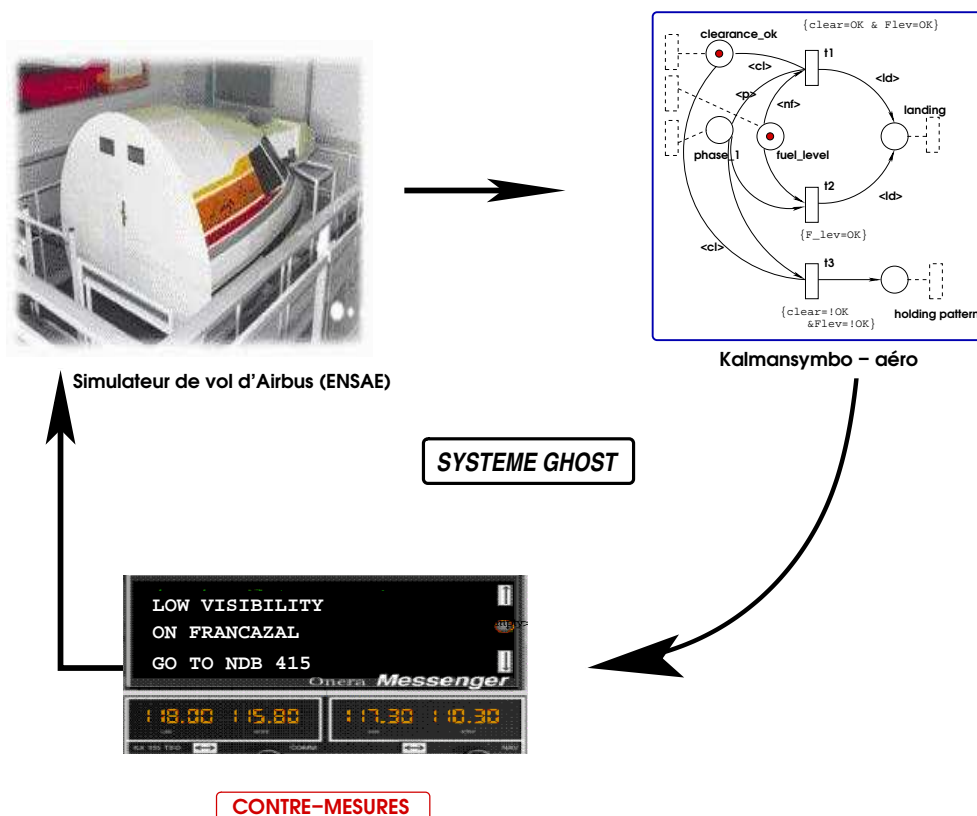


FIG. 7.11: GHOST : système d'assistance au pilotage

Un tel système suppose de disposer d'un moyen de suivi et de prédiction

de l'activité du pilote (*Kalmansymbo-aéro*) pour détecter suffisamment tôt les conflits et d'un moyen d'élaboration automatique de contre-mesures adaptées à la situation dans laquelle se trouve le pilote (c.f. figure 7.11). Ces recherches sont réalisées en collaboration avec l'ENSAE-Supaéro⁴ qui met à la disposition de notre équipe un simulateur d'Airbus monté sur vérins.

- La définition de ce système a fait l'objet de trois études prospectives pour :
- étudier la portabilité du système Ghost sur avions de la famille Airbus ;
 - adapter le principe de l'estimateur symbolique Kalmansymbo [Tessier, 2003] au suivi de l'activité de pilotage (*Kalmansymbo-aéro*) ;
 - préparer l'environnement de simulation en adaptant l'interface du magicien d'Oz au simulateur d'Airbus de Supaéro.

Perspectives pour la mise en place de Ghost

Portabilité de Ghost

Une première étude préparatoire [Toussaint, 2003] a été réalisée pour évaluer la portabilité du système Ghost sur les appareils de la famille Airbus. Cette analyse a porté sur :

- l'interface du cockpit de ce type d'appareil ;
- la gestion des pilotes automatiques ;
- le fonctionnement et le principe des alarmes sur Airbus 310 et 320 ;
- les accidents et les incidents liés à des conflits entre l'équipage et ses systèmes automatiques ;
- la construction d'un modèle descriptif d'activité pour la phase d'atterrissage sur Airbus 320.

Ce travail a permis de montrer que le système Ghost peut s'intégrer totalement dans le cockpit de ce type d'appareil car la détection des conflits en temps réel est réalisable à partir des paramètres de vol et les interfaces numériques de ce type d'avion autorisent l'envoi de contre-mesures. En effet, contrairement à l'avion utilisé dans nos expérimentations où les cadrans sont disséminés dans le cockpit, l'interface des Airbus est beaucoup plus synthétique (c.f. figure 7.12) et repose sur 2 familles d'écrans (EFIS, ECAM) et un afficheur du calculateur de bord situé sur le pedestal, facilitant la perception des contre-mesures.

⁴École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace

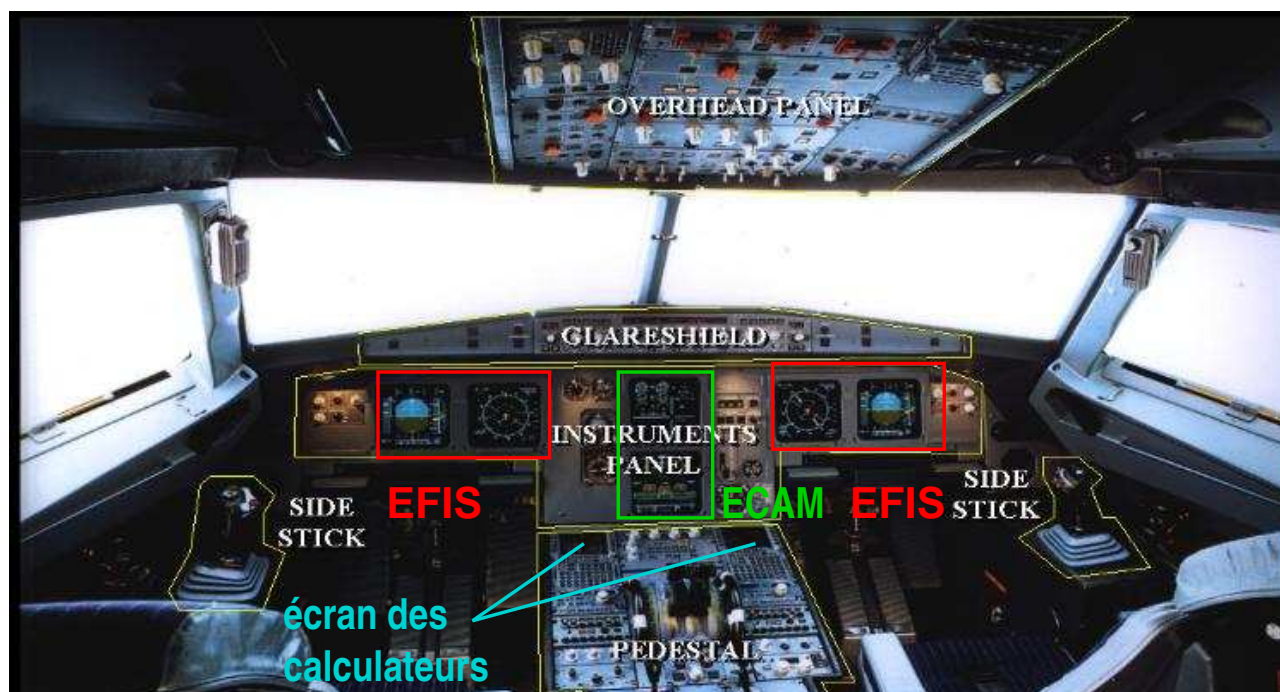


FIG. 7.12: Les EFIS, ECAM et les écrans du pedestal représentent les endroits possibles d'envoi de contre-mesures. En revanche, il est impossible de transmettre des contre-mesures sur le panneau supérieur ou "overhead panel".

Par ailleurs l'étude d'événements aériens sur cette famille d'appareils, mais aussi sur d'autres aéronefs (Boeing, Mac-Donnell..), a révélé l'existence d'accidents ou d'incidents dus à des conflits entre l'équipage et ses systèmes automatiques. L'analyse de ces événements établit que les pilotes ont persévéré en dépit d'alarmes sonores et visuelles destinées à prévenir les équipages du changement de mode des pilotes automatiques. Ainsi, Ghost semble pertinent et indiqué pour apporter de nouveaux éléments de sécurité aérienne dans ce type de dégradation des interactions pilotes/systèmes.

Kalmansymbo-aéro

Kalmansymbo permet de mettre en œuvre les principes de prédiction et de recalage pour le suivi de situation à partir de données symboliques. L'idée est d'appliquer ces principes à Ghost pour suivre et prédire l'activité des pilotes et aider ainsi à la prévention des conflits. De nouvelles hypothèses et des extensions au modèle initial ont été faites pour adapter l'estimateur symbolique à l'activité de pilotage [Grisel, 2002 ; Lesire, 2003]. L'adaptation de Kalman-

symbo au domaine aéronautique, ou *Kalmansymbo-aéro*, nécessite d'une part la modélisation des procédures relatives aux objectifs de la mission et d'autre part la mise en œuvre des principes de prédiction et recalage sur ces modèles de procédures. Le formalisme choisi pour représenter les procédures est celui des réseaux de Petri, chaque place représentant les buts des pilotes, les transitions correspondant aux conditions d'atteinte de ces buts.

Afin de valider ces principes, un premier logiciel a été mis au point et est testé sur le scénario de la mission " Ravitaillement " (c.f. chapitre 5). À partir des paramètres de vol récupérés lors de nos premières expérimentations, ce logiciel analyse et prédit l'activité des pilotes (c.f. figure 7.13) [Dehais *et al.*, 2004].

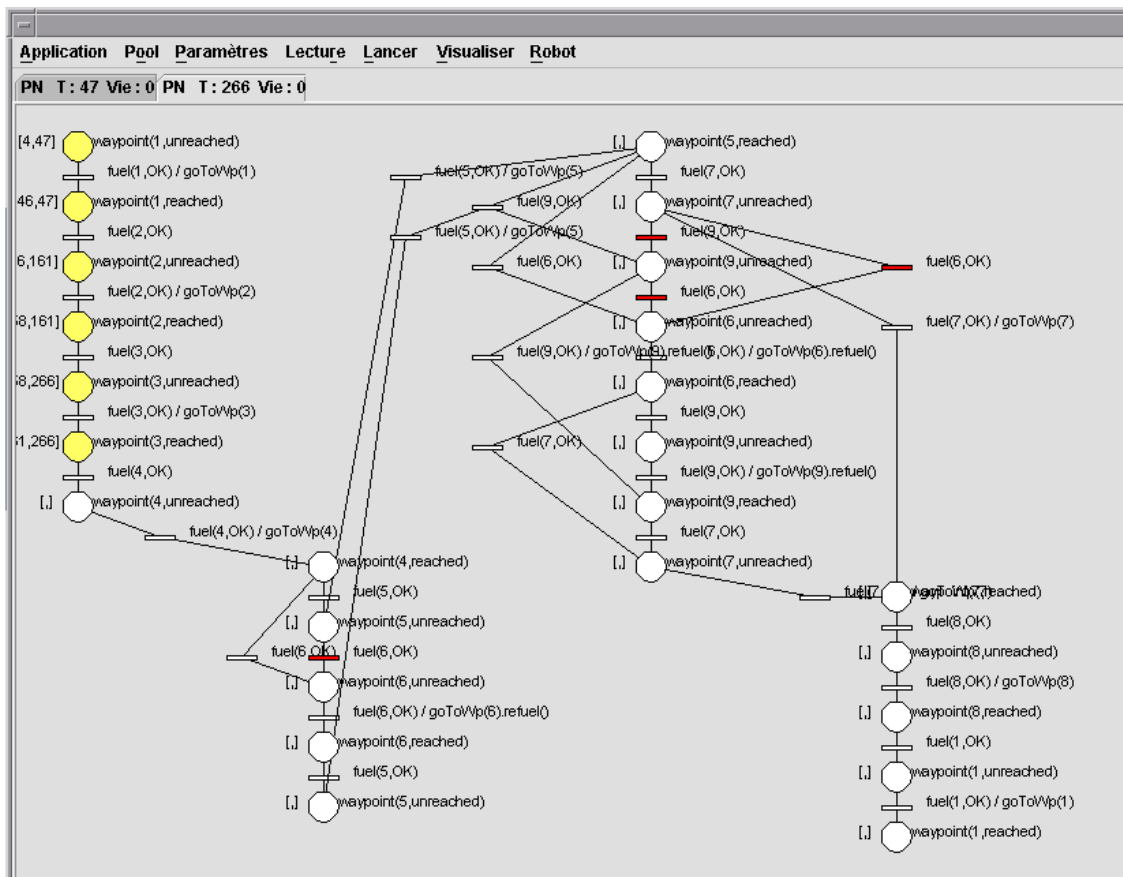


FIG. 7.13: Logiciel de suivi de situation *Kalmansymbo-aéro* : sur cette figure est modélisée la mission " Ravitaillement ". Sur cette capture d'écran, le pilote se dirige vers le point tournant 1 et les buts prédits apparaissent en jaune)

Dans cette application, la modélisation de l'activité des pilotes et sa

prédiction est relativement aisée : le nombre de buts possibles est restreint, les procédures de pilotage sont simples, il n’y a pas d’incertitude sur les paramètres de vol, et seule la gestion du carburant peut mener au conflit. D’autre part, la première version de *Kalmansymbo-aéro* n’intègre pas la détection des écarts aux modèles de situation ni la détection de conflit.

Adapter *Kalmansymbo-aéro* au suivi de l’activité d’un équipage d’avion de ligne nécessite d’approfondir et de traiter les notions d’écarts numériques et symboliques et d’incertitude sur ce type de données. Ce travail fait actuellement l’objet d’une thèse [Lesire, 2006]

Enfin l’idée est d’introduire la détection de conflit dans *Kalmansymbo-aéro* comme une extension de la détection des écarts de mise en correspondance entre observations et états attendus.

Expérimentations

La mise en place de Ghost dans son ensemble repose sur plusieurs phases d’expérimentations pour :

- valider les capacités de *Kalmansymbo-aéro* à suivre l’activité des pilotes et à prédire l’apparition de conflit ;
- définir les contre-mesures et évaluer leurs effets sur la performance des équipages.

L’environnement de simulation est actuellement en préparation : l’interface du magicien d’Oz pour l’envoi de contre-mesure est adaptée pour se connecter au simulateur de l’Ensaë. Dans l’état actuel des choses, un opérateur peut interagir sur le PFD⁵ en faisant disparaître certaines données et les remplacer par du texte (c.f. figure 7.14) [Barriere, 2004]. Ce travail doit se poursuivre de manière à pouvoir envoyer des contre-mesures sur l’ensemble des interfaces du simulateur.

Suivi de situation et détection de conflit

La mise en place du suivi de situation repose sur la modélisation de l’activité des pilotes. Ces modèles sont construits sur la base d’entretiens avec des pilotes et ensuite vérifiés par des expérimentations en simulateur de vol.

Par ailleurs, l’objectif étant d’intégrer la détection de conflit dans *Kalmansymbo-aéro*, il nous faut également vérifier la capacité de notre modèle à identifier les conflits entre plusieurs agents humains et artificiels (pilote, copilote, pilote automatique).

⁵Primary Flight Display, écran qui donne les informations relatives au vol : altitude, vitesse, assiette...

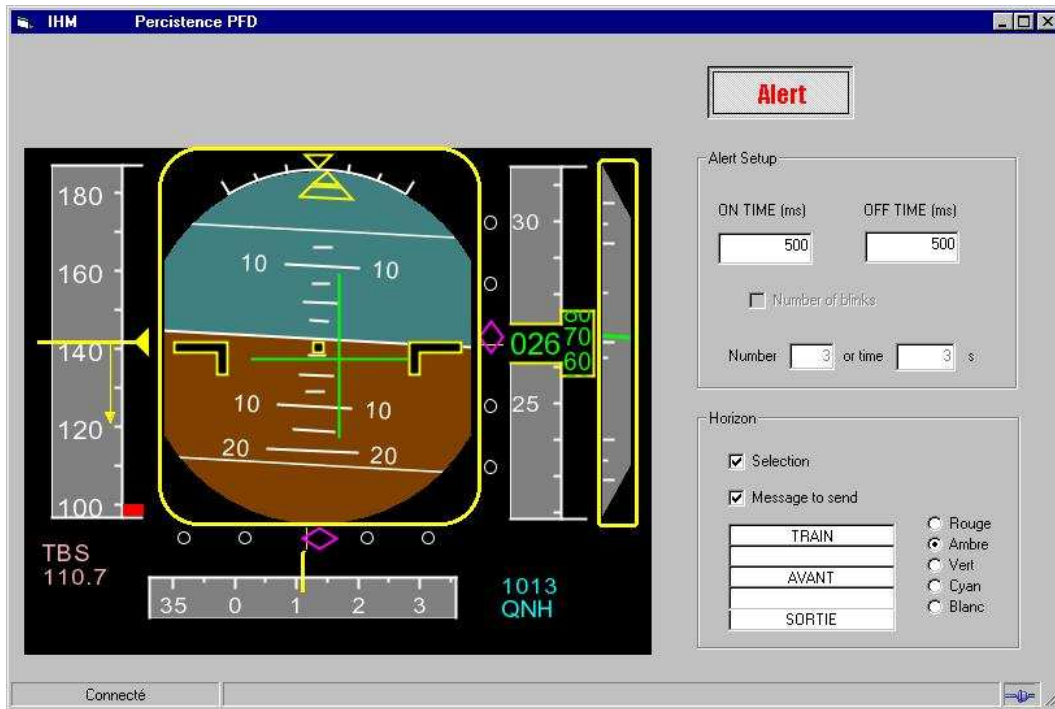


FIG. 7.14: Cette interface permet à un opérateur de déclencher des contre-mesures sur le PFD dans le cockpit du simulateur. Il est possible de faire disparaître ou clignoter n'importe quelle information du PFD (ex : l'horizon artificiel) et de le remplacer par un message. La fréquence de disparition est paramétrable, ainsi que la couleur du texte (rouge, ambre, vert...)

Des expériences doivent être menées en jouant sur les différentes composantes du conflit (c.f. partie 7.7.2) de manière à mieux comprendre leurs effets sur l'activité des pilotes. On peut envisager, par exemple, des scénarios où l'on fait varier la nature du conflit :

- conflit provoqué par la panne d'un système ;
- conflit provoqué par le pilote automatique (ex : changement inopiné de mode de pilotage) ;
- conflit provoqué par le copilote, complice des expérimentateurs.

Ces expérimentations ont également pour objectif d'étudier sans doute de nouveaux comportements émergents liés au conflit entre plusieurs agents humains et autres que la persévération.

Définition des contre-mesures

La définition des contre-mesures repose sur la détermination de l'endroit de leur envoi et du type de message à transmettre. Les procédures de vol ne donnent que peu d'éléments sur le lieu où les pilotes doivent poser leur regard en fonction de leur activité : des expérimentations fondées sur l'interview de pilotes et l'utilisation d'eye-tracking peuvent permettre de modéliser en partie l'activité oculaire des pilotes.

Pour valider les contre-mesures, l'idée est de reproduire en simulateur des scénarios d'accidents ou d'incidents réels où des équipages ont persévéré. Plusieurs conditions expérimentales peuvent alors être envisagées :

- sans contre-mesures ;
- avec contre-mesures partielles (uniquement disparition d'information) ;
- avec contre-mesures totales (retrait et message) ;
- avec des contre-mesures erronées.

C'est également en multipliant les expérimentations qu'il va être possible de déterminer à quel point il existe des classes de situation conflictuelles auxquelles correspondent des catégories de contre-mesures.

Bibliographie

- C. Alwood (1984). Error detection processes in statistical problem solving. *Cognitive science*, 8 :413–437.
- R. Amalberti (1996). *La conduite des systèmes à risques*. PUF.
- R. Amalberti (2001). Revisiting safety and human factors paradigm to meet the safety challenges of ultra complex and safe systems. In B. Willpert et B. Falhbruch, editors, *Challenges and pitfalls of safety interventions*. Elsevier : North Holland.
- R. Amalberti (2002). Une réflexion sur le rôle des hommes dans les systèmes intelligents et automatisés. In *Le rôle de l'être humain dans les systèmes automatisés intelligents*, Varsovie, Pologne. RTO HFM.
- R. Amalberti et F. Deblon (1992). A cognitive modelling of fighter aircraft process control : a step toward an intelligent on-board assistance system. *International journal of man-machine studies*, 36(5) :639–671.
- J. Austin (1962). *How to do things with words*. Oxford University Press, London, UK.
- F. Bacon (1996). *Entretien avec Michel Archimbaud*. Gallimard.
- A. Baddeley (1990). *Human memory. Theory and Practice*. Lawrence Erlbaum, Londres.
- S. Barriere (2004). Persévérance. Technical report, Supaéro - UPS, Toulouse.
- C. Barth (2003). Évaluation du fonctionnement de l'EGPWS et de la fonction Predictive Wind Shear. Technical report, Rapport de PFE, Supaéro, Toulouse.
- C. Bastien (1997). *Les connaissances de l'enfant à l'adulte*. Armand Colin.
- BEA (2000). Objectif : destination. Technical report, Bureau Enquête Accident. <http://www.bea-fr.org/francais/rapports/rap.htm>.
- BEA (2003a). Bea : qui sommes nous ? Technical report, Bureau Enquête Accident. <http://www.bea-fr.org/francais/bea/bea.htm>.
- BEA (2003b). Incidents et pilote automatique. Technical report, Bureau Enquête Accident. <http://www.bea-fr.org/francais/rapports/rap.htm>.

- J. Beauvois et R. Joule (1999). A radical point of view on dissonance theory. In E. Harmon-Jones et J. Mills, editors, *Cognitive Dissonance : Progress on a Pivotal Theory in Social Psychology*. Washington DC :A.P.A.
- J. Bell (1995). Changing attitudes. In M. Wooldridge et N. Jennings, editors, *Intelligent agents : theories, architecture and languages*. Springer Verlag.
- G. P. BERON, F. (1995). La résolution de conflit sans négociation : modèle et évaluation. In *Actes des troisièmes Journées Francophones IAD et SMA*, St Baldoph. Hermès.
- A. Berthoz (2003). *La décision*. Odile Jacob, Paris.
- C. Billings (1991). Human-centered aircraft automation : a concept and guidelines. Technical Report Nasa contractor report 103885, Nasa Ames Research Center.
- C. Billings et W. Reynards (1984). Human factors in aircraft incidents : results of a 7-year study. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 55 :960–965.
- C. Billings et D. Woods (1994). Concerns about adaptative automation in aviation systems. In M.M. Mouloua et R. Parasuraman, editors, *Human performance in automated systems*. L. Erlbaum, N.J. Hillsdale.
- K. Boley (1986). Error-free performance. *Flightfax*, 14.
- F. Braudel (1983). Les illusions douloureuses. In C. Cherki, editor, *Les années trente à la guerre*, page 3. L'histoire/Seuil.
- J. Breuker et W. de Velde (1994). *Common-KADS Library for expertise modelling Reusable problem solving components Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*. Ios.press edition.
- D. Broadbent (1958). *Perception and Communication*. New York, Pergamon Press.
- R. Brown et C. Marsden (1991). Dual task performance and processing resources in normal subjects and patients with parkinson's disease. *Brain*, 114 :215–231.
- T. Callantine (2002). Activity tracking for pilot error detection from flight data. Technical report, NASA.
- V. Camps (1998). *Vers une théorie de l'auto-organisation dans les systèmes multi-agents basée sur la coopération : application à la recherche d'information dans un système d'information répartie*. PhD thesis, IRIT.
- J.-F. Camus (1996). *La psychologie cognitive de l'attention*. Armand Colin.
- C. Castelfranchi (1992). *A.I.*, chapter Communication from an artificial intelligence perspective. Springer Verlag.
- C. Castelfranchi (2000). Conflict ontology. In H.-J. Müller et R. Dieng, editors, *Computational conflicts - Conflict modelling for distributed intelligent systems*, pages 21–40. Springer Verlag.

- J. Cellier (1990). *L'erreur humaine dans le travail*. In *Les facteurs humains de la fiabilité*, Leplat J., Terssac G. de (eds). Paris, Octares entreprises.
- J.-M. Cellier (1996). Exigences et gestion temporelle dans les environnements dynamiques. In J.-M. Cellier, V. De Keyser, et C. Valot, editors, *La gestion du temps dans les environnements dynamiques*, pages 19–48. Paris : PUF.
- L. Chaudron, F. Dehais, O. Grisel, F. Schwach, et C. Tessier (2002). Ghost : environnement d'experimentation des contre-mesures du syndrome de persévération chez les pilotes. In *IHM 2002, 14ème Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine*. T. Baudel, P. Girard, M. Noirhomme-Fraiture, J. Vanderdonckt.
- L. Chaudron, F. Dehais, P. Le Blaye, et L. Wioland (1999). Human activity modelling for flight analysis. In *Proceedings of HCP'99, Intl. Conf. on Human Centered Processes*, Brest, France. Euro.
- L. Chaudron, H. Fiorino, N. Maille, et C. Tessier (2000a). *Computational conflicts*, chapter Difference : a key to enrich knowledge. Concepts and models. Springer Verlag.
- L. Chaudron, H. Fiorino, H.-J. Müller, et C. Tessier (2000b). Agent's conflict : new issues. In H.-J. M. C. Tessier, L. Chaudron, editor, *Conflicting agents : conflict management in multi-agent systems*, chapter 1, pages 1–30. Kluwer Academic Press.
- L. Chaudron, J.-Y. Grau, P. Le Blaye, et N. Maille (2000c). REX : a human factor flight safety research program. In *proceedings of ICAS 2000*, Harrogate, UK.
- L. Chaudron, P. Le Blaye, N. Maille, L. Wioland, et J.-Y. Grau (2000d). Retour d'expérience sur les facteurs humains pour la sécurité des vols des avions militaires. REX-FH, phase 2. Rapport final 1/7998.23-AER.00710.01F, Onera, Toulouse.
- L. Chaudron et N. Maille (1999). First-order context and formal concept analysis. In *Proceedings of the AAAI'99 Workshop on Reasoning in Context for AI Applications*, Orlando, USA. AAAI.
- R. Chu, P. Jones, et C. Mitchell (1995). Using the operator function model and OFMspert as the basis for an intelligent tutoring systems : a case based intelligent tutoring system. In *Proceeding of the IEEE conference on systems, man, and cybernetics*, Vancouver.
- P. Clostermann (1990). *Une sacrée guerre*. Flammarion, Paris.
- H. Cohen (1993). *Neuropsychologie expérimentale et clinique*. Gaetan Morin.
- C. Coombs et G. Avrunin (1988). *The structure of conflict*. Lawrence Erlbaum Assoc.
- M. Coudarcher (1997). *Les grandes notions philosophiques : la connaissance, la raison, la science*. Seuil, Paris.

- A. Damasio (1994). *Descartes' Error*. G.P. Putnam's Sons, New York.
- B. D'Ausbourg, P. Benhamou, P. Carle, et R. Demolombe (1999). Prise en compte de l'intention de l'utilisateur pour la définition d'IHM de nouvelle génération. Technical report, ONERA 1/3746.00/DTIM.
- J. de Kleer et B. Williams (1987). Diagnosing multiple faults. *Artificial Intelligence*, 32 :97–130.
- A. Degani et E. Wiener (1993). Cockpit checklists : concepts, design, and use. *Human Factor*, 35 :345–359.
- A. Degani et E. Wiener (1997). Procedures in complex systems : the airline cockpit. In *IEEE Transactions on System, Man and cybernetics*, volume 27, pages 302–312.
- F. Dehais (2002). Modelling cognitive conflict in pilot's activity. In *STAIRS 2002 : Starting Artificial Intelligence Researchers Symposium*, pages 45–54, Lyon, France.
- F. Dehais et L. Chaudron (2000). Conflict modelling in combat flight activity. In *COOP'2000*, Sophia Antipolis.
- F. Dehais, C. Lesire, C. Tessier, et L. Chaudron (2004). Conflits et contre-mesures dans l'activité de pilotage. In *RFIA04*, Toulouse, France.
- F. Dehais et P. Pasquier (2000). Approche générique du conflit. In I. et ESTIA, editor, *ErgoIHM*. D.L.Scapin et E. Vergisson.
- F. Dehais, C. Tessier, et L. Chaudron (2003). Ghost : experimenting conflicts countermeasures in the pilot's activity. In *Ijcai conference*, Acapulco, Mexico.
- R. Demolombe et E. Hamon (2002). What does it mean that an agent is performing a typical procedure ? In *Proceedings of AAMAS'02*, pages 905–911, Bologna, Italy.
- M. Deutsch (1973). *The resolution of conflict*. New Have, CT : Yale University Press.
- DGAC (2003). Le déroulement d'une enquête. Technical report, Direction Générale de l'Aviation Civile. http://www.aviation.civile.gouv.fr/html/actu_gd/secu3/securit3_1.htm.
- R. Dieng (1995). Conflict management in knowledge acquisition.
- J. Dupont (1994). Le dossier des commandes de vol électriques. *Air & Cosmos Aviation International*, 1452 :61–73.
- B. Dupérier (1992). *Chasseur du ciel*. Perrin.
- E. Durfee, V. Lesser, et D. Corkill (1987). Coherent cooperation among communicating problem solveurs. In *IEEE Transactions on Computers*, volume 36, pages 1275–1291.

- S. Easterbrook (1993). *CSCW : Cooperation or Conflict ?* Springer, London.
- S. M. Easterbrook (1991). Handling conflict between domain descriptions with computer supported negotiation. *Knowledge Acquisition : An International Journal*, 3(4) :255–289.
- E. Edwards (1972). Man and machine : systems for safety. In *Proceedings of the British Airline Pilots Association Technical Symposium*, pages 21–36, London. British Airline Pilots Association.
- M. Endsley (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1) :32–64.
- P. Engel (2000). *L'erreur*, chapter La tragi-comédie des erreurs. Odile Jacob, Paris.
- F. Eustache et S. Faure (2000). *Manuel de neuropsychologie*, chapter Les syndromes frontaux. Dunod.
- J. Evans (1990). *Bias in human reasoning : causes and consequences*. Lawrence Erlbaum Associates, Hove and London (UK), Hillsdale (USA).
- L. Festinger (1957). *A theory of cognitive dissonance*. CA : Stanford University Press.
- H. Fiorino (1998). *Élaboration de conjectures par des agents coopérants*. PhD thesis, ENSAE, Toulouse.
- J. Fodor (1988). *Psychosemantics*. The MIT Press, Cambridge.
- M. Fox, N. Roth, K. Sadeh, et K. Sycara (1991). Distributed constrained heuristic search. In *IEEE Transactions on System, Man and cybernetics*.
- R. Gil (1996). *Neuropsychologie*. Masson, Paris.
- O. Giroud-Fliegner (2001). *Tout le monde peut se tromper. Essai sur l'erreur*. Seuil, Paris.
- J. Grau et S. Hourlier (2000). Les aides intelligentes au pilotage d'avions d'armes : concept et perspectives. *Revue Scientifique et Technique de la Défense*, 48.
- J.-Y. Grau (1994). Aspects médico-psycho-physiologiques des événements aériens au cours de l'année 1993. Technical report, IMASSA, Brétigny.
- J.-Y. Grau (1995). Aspects médico-psycho-physiologiques des événements aériens au cours de l'année 1994. Technical report, IMASSA, Brétigny.
- O. Grisel (2002). Conception d'un estimateur symbolique pour le suivi et la prédiction de situations. Rapport de stage de deuxième année, ENSTA - ONERA, Toulouse.
- B. Grosz et S. Kraus (1999). The evolution of SharedPlans. In A. Rao et M. Wooldridge, editors, *Foundations on theories of rational agencies*, pages 227–262.

- E. Hamilton (1978). *La mythologie*. Marabout Histoire.
- F. Harris, E. Kasper, et L. Iseler (2000). U.S rotorcraft accidents, 1963 through 1997. Technical Report 94035-1000, Nasa-Ames.
- F. Heider (1958). *The psychology of interpersonal relational*. Wiley and sons.
- H. Hesse (1975). *Le loup des steppes*. Le Livre de Poche, Paris.
- C. Hewitt (1986). Offices are open systems. In *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, volume 4, pages 271–287, New York. ACM Press.
- J. Hoc (1989). La conduite d'un processus à longs délais de réponse : une activité de diagnostic. *Le Travail Humain*, 52 :289–316.
- J. Hoc (2001). Towards a cognitive approach to human-machine cooperation in dynamic situations. *Internation Journal of Human-computer Studies*, 54(4) :509–540.
- E. Hollnagel (1994). The phenotype of erroneous actions. *Internation journal of Man-Machine studies*, 39 :1–32.
- O. Houdé (1995). *Rationalité, développement et inhibition. Un nouveau cadre d'analyse*. PUF, Paris.
- O. Houdé, D. Kayser, O. Koenig, J. Proust, et F. Rastier (1998). *Vocabulaire des sciences cognitives*. PUF, Paris.
- P. Jones et C. Mitchell (1994). Human-computer cooperative problem solving : theory, design and evaluation of an intelligent associate system. In *Proceedings of IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*.
- A. Kautz (1987). *A formal theory of plan recognition*. PhD thesis, University of Rochester.
- V. D. Keyser (1982). Les activités mentales dans les processus de production fortement automatisés. In *Le Travail Humain*, volume 45, pages 331–339.
- V. D. Keyser (1990). Fiabilité humaine et la gestion du temps dans les systèmes complexes. In *Les facteurs humains de la fiabilité*, pages 86–108. J. Leplat, G. de Terssac, Paris, octares entreprises edition.
- V. D. Keyser (1996). Les erreurs temporelles et les aides techniques. In *la gestion du temps dans les environnements dynamiques*, pages 287–309. J.M. Cellier, V. De Keyser et C. Valot, Le Travail Humain edition.
- V. D. Keyser et D. Woods (1990). *Systems Reliability Assessment*, chapter Fixation errors in dynamics and complex systems, pages 231–251. Kluwer Academic Press.
- M. Klein et A. Baskin (1990). A computational model for conflict resolution in cooperative design systems. In *Proc. Int. Working Conf. on Cooperating Knowledge Based Systems*, Springer. S.M. Deen.

- J. Kuchar et L. Yang (2000). A review of conflict detection and resolution modeling methods. In *Proceedings of IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, volume 1.
- J. Lauber (1984). Resource management in the cockpit. *Air line pilot*, 53 :20–33.
- P. Le Blaye, N. Maille, S. Habert, et P. Bourlier (2002). Système d’assistance au pilotage d’hélicoptère (PAVE). Technical Report Rapport d’activité DCSD 5/06753, Onera, Salon de Provence.
- M. Le Marc (1999). *Psychologie sociale*, chapter Du conflit. Bréal : collection Grand Amphi.
- K. Leiden, K. Laughery, J. W. Keller, J. French, W. Warwick, et S. Wood (2001). A review of human performance models for the prediction of human error. Technical report, Nasa-Ames, California.
- J. Leplat (1985). *Erreur humaine, fiabilité humaine dans le travail*. Paris, A. Colin.
- J. Leplat (1997). *Regards sur l’activité en situation de travail : contribution à la psychologie ergonomique*. Paris, PUF.
- J. Leplat et J. Hoc (1983). Tâche et activité dans l’analyse psychologique des situations. *Cahiers de Psychologie Cognitive*, 3 :49–63.
- M. Leroux (1997). Erato : une aide au contrôleur aérien. *Control*, 85 :66–79.
- C. Lesire (2003). Suivi de l’activité de pilotage par prédiction et recalage. Rapport de stage de DEA, ENAC - ONERA.
- C. Lesire (2006). *Estimation numérique-symbolique pour le suivi de l’activité de pilotage*. PhD thesis, Supaéro, Toulouse.
- H. Levine, H. Einsenberg, et A. Benton (1991). *Frontal lobe function and dysfunction*. Oxford University Press.
- K. Lewin, R. Lippitt, et R. K. White (1939). Patterns of aggression behavior in experimentally created “social climates”. *Journal of Social Psychology*, 10 :271–299.
- Liu et Sycara (1997). Coordination of multiples agents for production management. *Annals of Operations Research*, 75 :235–289.
- R. Loui (1987). Defeat among arguments : a system of defeasible inference. *Computational intelligence*, 3 :100–106.
- L. Loukopoulos, R. Dismukes, et I. Barshi (2001). Cockpit interruptions and distractions : a line observation study. In *International symposium on aviation psychology*, Columbus, USA.
- N. Luhmann (1987). The evolutionary differentiation between society and interaction. In *The micro-macro link*, pages 112–131.
- N. Maille (2003). Méthodes d’analyses centrées sur les facteurs humains pour des opérations aéronautiques militaires. Technical Report RF 2/07406 DCSD, ONERA.

- J. March et H. Simon (1958). *Organizations*. NY : Wiley, New York.
- J. Mason (1989). Datms a framework for distributed assumption reasoning. *Distributed Intelligence*, 2 :293-318.
- A. Merritt et B. Helmreich (1996). CRM : I hate it, what is it ? (Error, stress and culture. In *Orient Airlines Association Air Safety Seminar*, Jakarta, Indonesia.
- S. Milgram (1973). *Soumission à l'autorité*. Calmann-Lévy, Paris.
- C. Miller et B. Harry (2001). Associates with etiquette : meta-communication to make human-automation interaction more natural, productive and polite. In *Proceedings of the European Conference on cognitive Science approaches to process control*, Munich, Germany.
- E. Morin (1994). *La complexité humaine*. Champs - L'essentiel, Flammarion.
- J. Müller et R. Dieng (2000). On conflicts in general and their use in ai in particular. In H.-J.Müller et R.Dieng, editors, *Computational conflict*, chapter 1. Springer Verlag.
- D. Neri, R. Oyung, L. Colletti, M. Mallis, P. Tam, et D. Dinges (2002). Controlled breaks as a fatigue countermeasure on the flight deck. *Aviation, Space and Environmental Medicine*, 73 :654-664.
- NTSB (1988). Northwest Airlines. DC-9-82 N312RC, Detroit Metropolitan Wayne County Airport. Aircraft accident report. Technical Report NTSB/AAR 88/05, National Transport Safety Board.
- D. Ochanine (1978). Le rôle des images opératives dans la régulation des activités de travail. *Psychologie et Education*, 2 :63-72.
- J. Orasanu et L. Martin (1998). Errors in aviation decision making : a factor in accidents and incidents. In *Proceedings of HESSD*, Seattle, Washington, USA.
- J. Pastor (1999). *Raisonnement et mécanismes cérébraux sous-jacent. Approche par l'intelligence artificielle. Mémoire d'habilitation à diriger la recherche*. Université de Rennes 1.
- J. Pastor (2000). Cognitive performance modeling - Assessing reasoning with the EARTH methodology. In *COOP'2000*, Sophia Antipolis.
- B. Pavard et J. Dugdale (2000). The contribution of complexity theory to the study of socio-technical cooperative systems. In *Proceedings of the International Conference on Complex Systems (ICCS)*, Nashua, USA.
- Z. Pawlak (1984). On conflicts. *International Journal on Man-machine Studies*, 21 :127-134.
- J. Piaget et A. Seminska (1941). *La g n se du nombre chez l'enfant*. Delachaux et Niestl , Neuch tel.
- J. Picoche (1994). *Dictionnaire  tymologique du fran ais*. Le Robert.

- M. E. Pollack (1990). Plans as complex mental attitudes. In P. R. Cohen, J. Morgan, et M. E. Pollack, editors, *Intentions in Communication*, pages 77–103. MIT Press, Cambridge, MA.
- O. Popov, R. Lalanne, et G. Gouardères (2002). Structure of multi-agent tutoring system and its application in aeronautical training. *The international journal of computers, systems and signals*, 3(2) :133–148.
- M. Posner (1975). Psychobiology of attention. In A. Press, editor, *Handbook of psychobiology*, pages 441–480. M. Gazzaniga, New York.
- F. Previc (2000). Neuropsychological guidelines for aircraft control stations. In *IEEE Eng Med Biol*, volume 19, pages 81–88.
- A. Pritchett et R. Hansman (1997). Pilot non conformance to alerting systems commands during closely spaced parallel approaches. Technical Report ASL-97-2, MIT Aeronautical Systems Laboratory, Cambridge, MA.
- L. Putnam et M. Poole (1987). Handbook of organizational communication : an interdisciplinary perspective. pages 549–599. Sage, Beverly Hills, L. Porter edition.
- J. Pétard (1999). *Psychologie sociale*. Bréal : collection Grand Amphi.
- J. Rassmussen (1986). *Information processing and human-machine interaction*. Elsevier Science Publishing Co, Amsterdam, North Holland.
- K. Rataj, J. and Bender et R. Kohrs (2001). Pilot assistant for approach and departure. In *27th European Rotorcraft Forum*, Moscow, Russia.
- J. Reason (1990). *Human error*. Cambridge University Press.
- R. Reiter (1987). A theory of diagnosis from first principles. *Artificial Intelligence*, 32(1) :57–96.
- J. Rey-Debove et A. Rey, editors (1994). *Le Nouveau Petit Robert*. Dictionnaires Le Robert.
- D. Rhoda et M. Pawlak (1999). An assessment of thunderstorm penetrations and deviations by commercial aircraft in the terminal area. Technical report, M.I.T.
- A. Rizzo, S. Bagnara, et M. Visciola (1987). Human error detection processes. *Internation of Man-Machine studies*, 36 :253–259.
- D. Rochowiak, J. Rogers, et S. Messimer (1994). Critiquing with multiple criteria : conflict detection and resolution. *AAAI-94 Workshop on Models of Conflict Management and Cooperative Problem Solving*.
- E. T. Rolls (1994). Emotion-related learning in patients with social and emotional changes associated with frontal lobe damage. *Journal of neurology, Neurosurgery, Psychiatry*, 57(12) :1518–1524.
- W. Rouse (1984). Design and evaluation of computer-based support systems. *Advances in human factors/ergonomics, human-computer interaction*.

- W. Rouse (1985). Conceptual design of a human error tolerant interface for complex engineering systems. In *Proceedings of the second IFAC/IFIP/IFORS/IEA conference on analysis, design and evaluation of man-machine systems*, Varese, Italy.
- W. Rouse, S. Rouse, et J. Hammer (1982). Design and evaluation of an onboard computer-based information system for aircraft. In *Proceedings of IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, pages 451–463.
- K. Rubin, P. Jones, et C. Mitchell (1988). Inference of operator intentions in supervisory control using a blackboard architecture. In *Proceedings of IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*.
- J. Sarazin (2001). Rvsm : après l'Atlantique, l'Europe. *Les dossiers DNA*.
- N. Sarter et M. Sarter (2003). Neuroergonomics : opportunities and challenges of merging cognitive neuroscience with cognitive ergonomics. *Theoretical issues in ergonomics science*, 4 :142–150.
- N. Sarter, R. Wickens, S. Kimball, R. Marsh, M. Nikolic, et W. Xu (2003). Modern flight deck automation : pilot's mental model and monitoring patterns and performance. In *Proceedings of the International Symposium on Aviation Psychology*, Dayton.
- N. Sarter et D. Woods (1994). Pilot interaction with cockpit automation ii. An experimental study of pilots' model and awareness of the flight management system. *International Journal of Aviation Psychology*, 4 :1–28.
- F. Schwach (2002). Développement d'un banc expérimentation de contre-mesures pour l'aide au pilotage. Technical report, Ensp - Onera.
- J. Searle (1969). *Speech acts : an essay in the philosophy of language*. Cambridge University Press.
- L. Selemon, P. Goldmanrakis, et C. Tamminga (1994). Prefrontal cortex and working memory. *American journal of Psychiatry*, 2 :155–165.
- H. Selye (1950). *Stress*. Montréal : acta Inc.
- SFACT (2002). Rapport annuel. Technical report, Service de la Formation Aéronautique et du Contrôle Technique.
- T. Shallice (1995). *Symptômes et modèles en neuropsychologie : des schémas aux réseaux*. PUF, Paris.
- C. Shannon, C.E. and Weaver (1975). *Théorie mathématique de la communication, traduit de l'anglais par Cosnier, Dahan, Economides*. Retz CEPL.
- M. Shaw et B. Gaines (1989). A methodology for recognizing conflict, correspondence, consensus and contrast in a knowledge acquisition system. *Knowledge Acquisition*, 1(4) :341–363.
- M. Shaw et B. Gaines (1994). Knowledge support systems for constructively channeling conflict in group dynamics. *AAAI-94 Workshop on Models of Conflict Management and Cooperative Problem Solving*.

- M. Sherif et C. Sherif (1953). *Groups in harmony and tension*. New York : Harper and Row.
- P. Sherman (1997). Aircrew's evaluation of flight deck automation training and use : measuring and ameliorating threats of safety. Technical Report 97-2, University of Texas Aerospace Crew Research Project.
- H. Shiffrin et W. Schneider (1977). Controlled and automatic human information processing. *Psychological review*, 84 :127–190.
- G. Simmel (2003). *Le conflit*. Circé/poche.
- L. Song et J. Kuchar (2001). Describing, predicting and mitigating dissonance between alerting systems. In *International workshop on human error, safety, and system development*, Sweden.
- J. Spérandio (1975). Phénomènes régulatoires associés aux variations de la charge de travail chez les contrôleurs de trafic aérien. In L. A. et al., editor, *Age et contraintes de travail*. NEB, Paris.
- J. Stroop (1935). Studies of interference in serial verbal reactions. *Journal of experimental psychology*, 28 :643–662.
- W. Sweet (1995). The glass cockpit. In *Proceedings of IEEE Spectrum*, pages 30–38.
- K. Sycara (1990). Persuasive argumentation in negotiation. *Theory and decision*, 28 :203–242.
- K. Sycara (1998). Multi-agent systems. *AI Magazine*, 19(2) :79–92.
- C. Tessier (2003). Towards a commonsense estimator for activity tracking. In *AAAI Spring symposium*, Stanford University, Palo Alto CA, USA.
- K. Thomas (1976). Conflict and conflict management. In D. Dunnette, editor, *Handbook of industrial and organizational psychology*, pages 889–935. Rand Mc Nally College Pub, Chicago.
- A. Touraine (1974). Conflits sociaux. In *Encyclopædia Universalis*.
- O. Toussaint (2003). Étude de portabilité du système Ghost sur avion de la famille Airbus. Rapport de stage de DESS, Université d'Aix-en-Provence - ONERA.
- H. Touzard (1977). *La médiation et la résolution des conflits*. Paris : PUF.
- P. Van Eslande (2001). Erreur de conduite et besoin d'aide : une approche accidentologique. In *Journée d'étude en psychologie ergonomique EPIQUE*.
- P. Van Eslande, L. Alberton, C. Nachtergaële, et G. Blancher (1997). Scénarios types de production de l'"erreur humaine" dans l'accident de la route. Technical Report 218, Inrets.
- F. Varela (1996). *Invitation aux sciences cognitives*. Seuil.

- P. Veillette (2001). Human error cited as major cause of U.S. commercial EMS helicopter accidents. *Flight Safety Digest*, 20.
- G. Vignaux (1991). *Les sciences cognitives : une introduction*. le Livre de Poche : biblio essais, Paris, la découverte edition.
- P. Vincke (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Collection SMA.
- J. Wanner (1992). Y a-t-il encore un pilote dans l'avion? *Le transpondeur : bulletin de liaison*, (7) :51–54.
- J. Wanner et N. Wanner (1999). Opérateur et sécurité. Technical report, 5/2.
- P. Watzlawick, J. Helmick Beavin, et D. Jackson (1967). *Pragmatics of human communication. A study of interactional patterns, pathologies, and paradoxes*. Norton, New York.
- E. Wiener (1987). Crew coordination and training in the advanced technology cockpit. In B. K. E. Wiener et R. Helmreich, editors, *Cockpit resource management*, pages 199–230. San Diego : Academic Press.
- L. Wioland (1997). *Etudes des mécanismes de protection et de détection des erreurs. Contribution à un modèle de sécurité écologique*. PhD thesis, Université Paris V.
- D. Woods, L. Johannsen, R. Cook, et N. Sarter (1994). Behind human error : cognitive systems, computers and hindsight. In *CESERIAC SOAR 94-01*, Wright-Patterson Air Force Base.
- Q. Yang (1992). A theory of conflict resolution in planning. *Artificial Intelligence*.

Modélisation des conflits dans l'activité de pilotage

La revue d'incidents aéronautiques a montré que l'apparition de conflits dans la gestion du vol est un précurseur remarquable d'accidents. Ces conflits peuvent se produire entre les différents agents du système aérien (équipage, contrôle aérien, interface de pilotage). Les premiers travaux de cette thèse ont consisté à proposer un modèle générique pour détecter les conflits entre agents. Ce modèle a ensuite été implémenté et testé dans des expérimentations avec des pilotes en simulateur de vol. Ces expériences ont permis de valider nos idées sur le conflit mais ont montré que les pilotes, lorsqu'ils sont confrontés à un conflit, ont tendance à persévérer et à s'enfermer dans la résolution du problème au détriment de la surveillance des paramètres vitaux. Pour étudier ce comportement, nous avons développé GHOST, environnement expérimental constitué d'un simulateur de vol connecté à une interface qui permet à un magicien d'Oz de créer des situations conflictuelles mais surtout d'envoyer des contre-mesures pour sortir le pilote de sa persévération. Ces contre-mesures reposent sur le principe d'un retrait ciblé de l'information : le cadran sur lequel se focalise le pilote disparaît puis est remplacé momentanément par un message pertinent en termes de sécurité. L'environnement GHOST a été testé avec 22 pilotes et les résultats semblent prouver l'efficacité de cette approche.

Mots clés : facteurs humains, aviation, conflit, persévération, neurosciences, IA.

Modelling conflicts in the pilot's activity

The review of air safety reports has revealed that a conflictual situation is a precursor of air accidents. Conflicts may occur between the different agents of the aeronautical system (aircrew, ATC, user's interface). Therefore, the initial work in this thesis has consisted in proposing a generic model to detect conflict between agents. This model has then been implemented in a flight simulator and tested with pilots. The results of these first experiments have proved the capability of our model to track conflicts, but has also shown a trend to perseveration together with erroneous behaviors when the pilots were facing a conflictual situation. So as to study this particular behavior, an experimental environment called Ghost has been designed : it is composed of a flight simulator connected to an interface that allows a wizard of Oz to trigger events to create conflictual situations and to send cognitive countermeasures to cure pilots of perseveration. These countermeasures are based on information removal : the interface on which the pilot is focused is removed for a while and replaced with a an accurate message. The Ghost environment has been tested with 22 pilots and has shown the effectiveness of the countermeasures.

Keywords: human factors, aviation, conflict, perseveration, neurosciences, AI.

