

Thèse présentée pour obtenir le grade de Docteur de
l'Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II

Spécialité : Sciences du Mouvement Humain

**Apprentissage et atterrissage :
comment éduquer la perception des pilotes ?**

Présentée par : **Michaël HUET**

Soutenue publiquement le 17 décembre 2010, devant le jury composé de :

J. MCINTYRE	CR 1 CESEM, Paris Descartes	Rapporteur
B. THON	PR Université Paul Sabatier, Toulouse III	Rapporteur
R. BOOTSMA	PR Université de la Méditerranée, Marseille	Examineur
R. GRAY	PR Université de Birmingham, Angleterre	Examineur
C. CAMACHON	Enseignant Chercheur CREA, Salon de Provence	Dir. de thèse
G. MONTAGNE	PR Université de la Méditerranée, Marseille	Dir. de thèse
D. BAZALGETTE	Responsable métier Facteurs Humains DGA, Paris	Invité

École Doctorale Sciences du Mouvement Humain - ED 463
Institut des Sciences du Mouvement - UMR 6233 CNRS & Université de la Méditerranée

*A Manon, Alexis, Adélie, Léha, Noa et Louise,
ces pitchouns qui commencent à apprendre.*

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Gilles Montagne et Cyril Camachon qui ont encadré cette grande aventure. Vous m'avez accompagné en me transmettant une rigueur scientifique et méthodologique qui a rendu ces années de thèse très formatrices. Votre confiance m'a permis de me concentrer sur mon travail et d'aller de l'avant. Merci pour votre disponibilité et de m'avoir laissé une grande part de liberté dans ce travail tout en étant présent lorsque j'en avais besoin. Bien plus qu'un encadrement, vous m'avez offert un soutien et regroupé toutes les conditions nécessaires pour que je puisse mener à bien ce projet.

Je souhaite également associer à ces premiers remerciements David Jacobs qui, en collaborant à l'ensemble des expériences de cette thèse, a largement contribué à l'élaboration de ma démarche et de ma pensée scientifique. Un grand merci à vous trois !

Je remercie Didier Bazalgette et la Direction Générale de l'Armement pour avoir soutenu et financé la réalisation de cette thèse.

Que les membres du jury, Joseph McIntyre, Bernard Thon, Reinoud Bootsma et Rob Gray soient assurés de ma profonde gratitude. Merci pour l'intérêt que vous avez porté à ce travail en acceptant de l'expertiser.

Cette thèse a été réalisée au sein de l'Institut des Sciences du Mouvement, UMR 6233 CNRS et Université de la Méditerranée. Je tiens à remercier son directeur, Jean Louis Vercher ainsi que les personnes qui participent au bon fonctionnement et à la vie scientifique du laboratoire. Merci notamment à Mireille Meozzi, Nathalie Fenouil, Bernadette Besson et Sylvain Floucat pour leur disponibilité. Merci à Cedric Goulon, qui a su repousser les limites d'I.C.E et a pu permettre la conception du simulateur de vol. Merci à Franck Buloup pour son aide sur le docomètre, à Thelma Coyle pour ses astuces sur Matlab et à Frederic Pous pour ses précieux conseils sur L^AT_EX et la mise en forme de cette thèse.

Merci à toutes les personnes qui ont donné de leur temps pour participer à ces (longues) séries d'expériences.

Merci à David Travieso pour son accueil chaleureux et sa gentillesse durant mon séjour à l'Université Autonome de Madrid.

Merci à mes compagnons d'escalade, Antoine, Patricia, Tom (Gutenberg, je re-

viendrai!) et Alex pour avoir partagé ces coins insoupçonnés dans les calanques ou à Vallouise. Merci au club de la rue Decazes, Aurore, Jorys, Tom, Alban pour leur porte toujours ouverte. Merci à Jérôme, "ptit" Mat et Jean Pierre pour le vent de fraîcheur qui souffle à chacun de leur passage dans le bureau. Merci aux colocataires du bureau B.202, Matt pour ton rire venu des îles et Nico pour ton inoxydable bonne humeur. Merci à Cécile et Violaine pour votre énergie sans limite. Merci à Julie et Georgio pour leur coup de pouce sur l'anglais. Merci à la promo du Master 2, Aurore, Enora et Colas pour l'esprit d'entraide qui a régné toutes ces années. Merci à Colas, qui a partagé les innombrables pauses et largement dépassé le cadre d'un collègue de labo !

Merci à mes indispensables ami(e)s, Vincent, Niv, Fredo, Elo et Popo. Votre amitié m'est très précieuse. Merci pour le recul que vous m'avez apporté avec vos incroyables aventures.

Merci à ma famille. Merci Maman, Papa et Candice. Parce que vous m'avez toujours soutenu et parce que sans vous, rien n'aurait été possible.

Enfin, j'adresse mes plus grands remerciements à la personne qui remplit mon quotidien de rire, de bonne humeur, de volonté et d'envie. Alex, ta présence et ton soutien sans faille m'ont permis de traverser bien des épreuves et d'éclairer le grand chemin de la Vie. Mille mercis !

Table des matières

Avant-propos	1
I Introduction	5
1 Cadre Général	7
1.1 Qu'est ce que l'atterrissage ?	8
1.1.1 L'alignement	9
1.1.2 La phase d'approche finale	10
Les procédures d'approche	10
La pente d'approche	11
Les systèmes lumineux d'indicateurs de pente	12
1.1.3 L'arrondi	14
1.2 Pourquoi s'intéresser à la phase d'atterrissage ?	15
1.2.1 Atterrissage et accidentologie	15
1.2.2 Atterrissage et perception visuelle	17
1.2.3 Atterrissage et formation	21
2 Contexte Théorique	23
2.1 Introduction à l'approche écologique de la perception et de l'action	24
2.1.1 Les fondements de l'approche écologique	24
Le système agent-environnement	24
Cycle perception-action	25
Quelle conception du couplage perception-action ?	26

TABLE DES MATIÈRES

2.1.2	Les concepts clés	28
	Information et flux optique	28
	Le concept d'invariant	30
2.2	Le contrôle visuo-moteur de la phase d'approche	31
2.2.1	Focus d'expansion optique et angle H	31
2.2.2	La forme de la piste	34
2.2.3	La texture du sol	37
2.2.4	Conclusions	40
2.3	L'apprentissage des habiletés perceptivo-motrices	41
2.3.1	L'approche cognitive de l'apprentissage	42
2.3.2	L'approche écologique de l'apprentissage	43
	Éducation de l'intention	43
	Éducation de l'attention	44
	La calibration	51
	Comment s'opère l'apprentissage perceptivo-moteur ?	52
2.3.3	Conclusions	53
2.4	Comment faciliter l'apprentissage d'une tâche perceptivo-motrice ?	54
2.4.1	Apprentissage et feedback	54
	Définition et principaux types de feedback	54
	Comment administrer le feedback ?	56
	Vers une conception écologique du feedback simultané	59
2.4.2	Apprentissage et aménagement de la pratique	60
	La variabilité de la pratique	61
	L'interférence contextuelle	62
	La spécificité de la pratique	64
	Une nouvelle utilisation de l'aménagement de la pratique	65
 II Chapitres Expérimentaux		67
3	Effets du feedback simultané à la demande sur l'éducation de l'attention	69
4	Effets du feedback simultané sur l'apprentissage de la phase d'approche	95
5	Variabilité de la pratique, apprentissage et éducation de l'attention	117
 III Épilogue		145
Bibliographie		183

Table des figures

1.1	Représentation du circuit de piste standard	9
1.2	Pistes dont l'approche comporte des risques particuliers	13
1.3	Pistes équipées d'un système lumineux d'aide à l'atterrissage PAPI	13
1.4	Représentation schématique du PAPI	14
1.5	Répartition des accidents d'avion selon les différentes phases de vol	16
1.6	Typologie des accidents aériens entre 2002 et 2006	17
1.7	Influence de l'environnement sur la perception de l'altitude	18
1.8	Configuration du terrain et perception de l'altitude	19
1.9	Aéroport de La Guardia à New York	20
2.1	Couplage entre l'agent et l'environnement	25
2.2	Les différents niveaux d'analyse du cycle perception-action	27
2.3	Configuration optique	29
2.4	Représentation vectorielle du flux optique	29
2.5	Le focus d'expansion optique	32
2.6	Illustration de l'angle H (ou distance H)	33
2.7	Déviations latérales de la forme de la piste	34
2.8	Déviations verticales de la forme de la piste	35
2.9	Système lumineux d'approche	36
2.10	Angles de <i>splay</i> et de <i>depression</i>	38
2.11	Représentation schématique d'une collision de balles	47
2.12	Exemples expérimentaux d'éducation de l'attention	50
2.13	Effet de la fréquence de présentation du feedback	57
2.14	Effet de différents types de feedback	58

TABLE DES FIGURES

2.15	Effet de la variabilité de la pratique	61
2.16	Effet de l'interférence contextuelle	63
3.1	Dispositif expérimental expérience 1	76
3.2	Feedback simultané sous la forme d'une jauge ou de portes fantômes	78
3.3	Pourcentage de franchissements corrects	81
3.4	Variabilité de la vitesse et de l'erreur courante	83
3.5	Profils d'erreur courante	85
3.6	Fréquence de demande du feedback simultané	86
3.7	Moments des demandes du feedback simultané	87
3.8	Variabilité de l'erreur courante au moment de la demande	88
4.1	Représentation des codes couleurs du PAPI	98
4.2	Dispositif expérimental expérience 2	102
4.3	Scènes visuelles utilisées	103
4.4	Temps passé dans le cône de descente (exp. 2)	105
4.5	Altitude deviation (exp. 2)	107
4.6	Décours temporel de l'altitude déviation au cours de l'essai	108
4.7	Fréquence de demande du PAPI	109
4.8	Moments des demandes du PAPI	110
4.9	Temps passé dans le cône, tests de transfert	111
4.10	Différences inter-individuelles, tests de transfert	112
5.1	Dispositif expérimental expérience 3	124
5.2	Temps passé dans le cône de descente (exp. 3.1)	127
5.3	Altitude deviation (exp. 3.1)	128
5.4	Fréquence des demandes (exp. 3.1)	129
5.5	Temps passé dans le cône de descente et altitude deviation (exp. 3.2)	133
5.6	Analyse qualitative des trajectoires d'approche, goupe cockpit fixe	134
5.7	Analyse qualitative des trajectoires d'approche, groupe piste fixe	135
5.8	Espace d'informations	137
5.9	Fréquence des demandes du feedback (exp. 3.2)	139
5.10	Représentation schématique d'une fonction potentielle	142
5.11	Système de Visualisation Tête Haute	164

Avant-propos

Ce travail de thèse a fait l'objet de quatre articles, publiés (3) ou soumis (1) dans des revues internationales. Les articles 2, 3 et 4 sont présentés dans la partie centrale de ce manuscrit tels qu'ils ont été soumis pour publication, l'article 1 ayant servi de support à la rédaction d'une partie du chapitre théorique.

Article 1. Camachon, C., Jacobs, D.M., Huet, M., Buekers, M., Montagne, G. (2007). The role of concurrent feedback on learning to walk through sliding doors. *Ecological Psychology*, 19, 367-382.

Article 2. Huet, M., Camachon, C., Fernandez, L., Jacobs, D.M., Montagne, G. (2009). Self-controlled concurrent feedback and the education of attention towards perceptual invariants. *Human Movement Science*, 28, 450-467.

Article 3. Huet, M., Jacobs, D.M., Camachon, C., Goulon, C., Montagne, G. (2009). Self-controlled concurrent feedback facilitates the learning of the final approach phase in a fixed-base simulator. *Human Factors*, 51, 858-871.

Article 4. Huet, M., Jacobs, D.M., Camachon, C., Missenard, O., Gray, R., Montagne, G. (soumis). The education of attention as explanation of variability-of-practice effects : learning the final approach phase in a flight simulator.

Les activités sportives constituent un exemple remarquable pour illustrer la complexité des mouvements que nous sommes capables de réaliser mais aussi pour mettre en avant les processus qui sont liés à l'acquisition de telles compétences. Lorsqu'il commence une nouvelle activité ou un nouveau sport, le débutant mesure rapidement le chemin à parcourir pour acquérir les bases de l'activité en question. Qu'il s'agisse du professeur de tango en train de montrer un nouveau pas de danse ou bien du moniteur de Savate faisant la démonstration d'un coup de pied circulaire, ces mouvements paraissent, de prime abord, faciles à réaliser. Les plus enthousiastes d'entre nous s'imaginent alors pouvoir rivaliser avec Bruce Lee après quelques heures de cours. Bien évidemment, en pratique, toute la difficulté se fait ressentir quand nous devons exécuter les mouvements en question, rappelant ainsi à quel point les processus d'apprentissage peuvent être longs et coûteux. Dans le cas d'une activité sportive, un peu de patience et de persévérance permettront à l'individu de progresser rapidement. Toutefois, l'acquisition de certaines compétences, telles que le vol à basse altitude ou le contrôle d'un avion lors de la phase d'atterrissage, nécessite une formation particulièrement rigoureuse. Malgré les avantages que pourraient mettre en évidence les recherches sur l'apprentissage, celles-ci sont relativement rares dans la littérature scientifique parce qu'elles nécessitent la mise en place de procédures expérimentales s'étalant sur plusieurs jours.

Les considérations précédentes peuvent être envisagées comme le fondement du travail dont le présent manuscrit rend compte. En effet, l'intérêt porté à la thématique de l'apprentissage et de la formation a permis de faire émerger un projet de recherche reconnu et soutenu par la Délégation Générale de l'Armement à travers un financement doctoral. C'est la raison pour laquelle ce travail de thèse a été réalisé avec la volonté d'apporter des éléments nouveaux sur la compréhension des mécanismes impliqués dans l'apprentissage perceptivo-moteur en prenant pour exemple l'exercice complexe que représente l'atterrissage d'un avion.

L'originalité de ce travail réside d'une part, dans le fait d'aborder la notion d'apprentissage à travers une tâche concrète et appliquée et d'autre part, dans le fait d'articuler cette réflexion autour d'une nouvelle approche conceptuelle de l'apprentissage perceptivo-moteur. En effet, nous proposons au sein de ce manuscrit une vision de l'apprentissage issue de l'approche écologique de la perception et de l'action Gibson (1950 ; 1966 ; 1979). La volonté de mener ces travaux, à la fois sur le plan fondamental et appliqué, représente pour nous un enjeu important. La découverte

des principes par lesquels l'habileté se construit renseigne le chercheur sur les processus les plus fondamentaux de la motricité humaine. En retour, ces connaissances permettent de concevoir des outils, procédures et procédés permettant d'améliorer les méthodes d'apprentissage mais aussi et pourquoi pas, la conception d'objets ou d'environnements virtuels destinés à la formation.

Cette thèse se décompose en trois parties. La première partie, nécessairement non exhaustive, s'articule autour des deux axes qui représentent les différentes facettes de ce travail. Ainsi, le premier chapitre fait état des différents aspects techniques liés à l'atterrissage et nous permettra d'expliquer pourquoi nous nous sommes focalisés sur la manœuvre de la phase d'approche. Le deuxième chapitre concerne les fondements de l'approche écologique de la perception et de l'action. Nous dresserons notamment l'état actuel des connaissances sur la conception écologique de l'apprentissage perceptivo-moteur ainsi que les moyens permettant de faciliter l'acquisition d'une nouvelle tâche.

La seconde partie regroupe les trois volets expérimentaux sur lesquels repose notre travail. Au cours de ces expériences, nous avons voulu questionner, en rapport avec notre cadre théorique, l'influence d'une information ajoutée dans l'environnement virtuel sur le processus d'apprentissage. Les chapitres trois et quatre s'intéressent donc à l'utilisation d'outils permettant d'améliorer l'apprentissage. Le cinquième chapitre s'attache à décrire les effets d'un aménagement particulier des conditions de pratique sur l'acquisition d'une nouvelle habileté.

Enfin, la troisième et dernière partie présente de manière synthétique les principaux résultats obtenus au cours de ce travail. Nous évoquerons ensuite l'apport que représente cette thèse au regard des aspects théoriques présentés dans la partie introductive, puis nous traduirons leur impact d'un point de vue appliqué en listant les retombées pratiques potentielles.

Première partie

Introduction

CHAPITRE 1

Cadre Général

Comme l'illustre la légende d'Icare, l'un des plus vieux rêves de l'Homme est de réussir à voler. A travers les âges, nombreux sont les inventeurs qui ont un jour essayé de réaliser ce rêve. Par exemple, dès le XVI^{ième} siècle, Léonard de Vinci a étudié scientifiquement la possibilité de faire voler des engins plus lourds que l'air. Combinant ses connaissances dans le domaine de la physique et des mathématiques avec ses observations sur le vol des oiseaux, le génie de la Renaissance dessina une étonnante variété d'appareils devant être actionnés par la force musculaire. Cependant, ces machines à ailes battantes se montrèrent inefficaces et ce n'est que bien plus tard que les choses allaient se concrétiser. Le premier vol réalisé à l'aide d'un moteur aurait été effectué en 1890 par le français Clément Ader aux commandes de l'Eole. Inspiré de la morphologie des chauves-souris, l'appareil lui aurait permis de s'élever à une vingtaine de centimètres du sol sur une distance de cinquante mètres, marquant ainsi le début de l'aviation. Bien qu'extraordinaire, cette première prouesse ne nécessitait pas encore de savoir comment reposer l'avion au sol.

Depuis, les progrès techniques de l'aéronautique permettent de voler à des altitudes vertigineuses en emportant toujours plus de passagers. La question de l'atterrissage devient alors cruciale. Lors de ce premier chapitre, nous aborderons plusieurs points liés à l'atterrissage. Dans un premier temps, nous décrirons les principales phases de l'atterrissage en portant une attention particulière à la phase d'approche qui est au coeur de ce travail de thèse. Une deuxième partie nous permettra ensuite de décrire les principales causes d'accidents et de comprendre pourquoi il est nécessaire de mener une réflexion sur la formation et l'apprentissage d'une tâche aussi complexe que l'atterrissage.

1.1 Qu'est ce que l'atterrissage ?

L'atterrissage comprend une succession de manœuvres complexes permettant d'amener l'avion vers le début de la piste pour le poser sur le sol. Il existe, pour chaque aérodrome, une procédure d'atterrissage appelée circuit de piste permettant de décrire l'itinéraire que doit emprunter le pilote pour atterrir. La Figure 1.1 illustre un circuit de piste standard avec les différentes étapes qui le composent. Dans la plupart des avions, le pilote est assis du côté gauche de l'appareil. Par défaut, le trafic aérien s'effectue donc du côté gauche afin que le pilote ait une meilleure visibilité de la piste et puisse constamment garder un contact visuel avec celle-ci. Les dernières étapes de l'atterrissage se décomposent en trois parties distinctes : l'alignement (virage entre l'étape de base et l'approche finale), l'approche finale et l'arrondi. Nous décrirons chacune de ces phases dans les paragraphes suivants en portant une

attention particulière à la phase d'approche finale qui constitue le cœur de cette thèse.

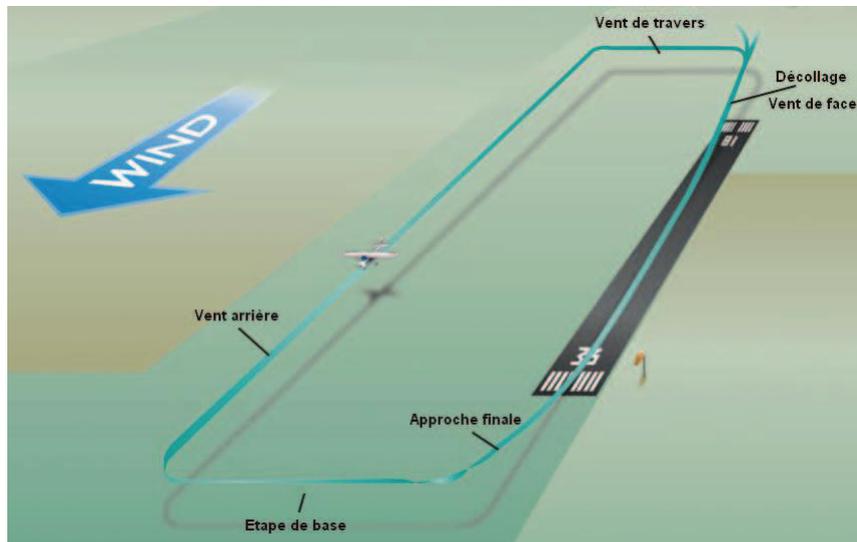


FIGURE 1.1 – Représentation du circuit de piste standard (d'après la *Federal Aviation Administration*, 2004).

1.1.1 L'alignement

Lorsque le pilote arrive à proximité de la piste, il peut suivre le circuit de vol en vigueur sur l'aérodrome dans sa totalité (cf., Figure 1.1) ou bien demander une autorisation pour rejoindre le circuit directement à l'étape de base. Lors de cette étape, le pilote arrive avec une trajectoire oblique ou perpendiculaire à la piste. Il devra ensuite effectuer un virage lui permettant de s'aligner avec l'axe de la piste en vue de l'atterrissage. Ce virage, permettant la transition entre l'étape de base et l'approche finale, s'appelle l'alignement (ou *base to final turn*). La difficulté de cette manœuvre réside dans le choix du moment auquel débiter le virage, de l'angle de rotation à adopter et enfin de la capacité du pilote à maintenir l'angle de rotation constant. Beal et Loomis (1997) ont tenté de déterminer les repères visuels nécessaires au contrôle de l'alignement à partir de données issues d'atterrissages réels. Les résultats révèlent que les pilotes s'appuieraient sur un angle particulier appelé l'angle de *splay* pour initier et contrôler leur manœuvre (cf., partie 2.2 pour une explication détaillée de l'angle de *splay*).

Certaines conditions obligent le pilote à effectuer ce virage plus ou moins loin de la piste. Par exemple, en cas de vent important, l'alignement devra être effectué proche de la piste pour éviter de subir de trop grandes déviations lors de la phase d'approche finale. Cependant, plus le virage sera exécuté près de la piste et plus la phase d'approche finale sera courte. Cela aura pour effet de diminuer la marge d'erreur disponible car le pilote n'aura que très peu de temps pour réaliser, si besoin est, les corrections permettant d'aligner l'avion avec l'axe de la piste. La précision de cette manœuvre est importante puisqu'elle conditionne le bon déroulement des étapes suivantes.

1.1.2 La phase d'approche finale

La phase d'approche finale est la manœuvre qui se déroule entre l'alignement et l'arrondi. Elle consiste à réduire progressivement l'altitude et la vitesse de l'appareil en se dirigeant vers le début de la piste. Cette manœuvre constitue la tâche servant de support à notre démarche expérimentale (cf., chapitres 4 et 5), c'est la raison pour laquelle nous en présenterons les aspects techniques les plus importants de façon détaillée.

Les procédures d'approche

Il existe deux règles de vol distinctes, consistant à suivre les règles de vol à vue en utilisant les repères extérieurs ou bien à suivre les règles de vol aux instruments. Un vol à vue ne peut s'effectuer qu'en plein jour, les heures de décollage et d'atterrissage possibles étant déterminées par le lever et le coucher du soleil. Le vol à vue nécessite aussi des conditions météorologiques permettant de rester à vue du sol (5 kilomètres de visibilité minimum) et à une distance suffisante des nuages (300 mètres verticalement). A l'inverse, lorsque ces conditions ne sont pas respectées, le pilote doit posséder une qualification particulière lui permettant de suivre les règles de vol aux instruments. En résumé, un vol aux instruments sera soumis à des procédures strictes de route ou d'altitude et peut s'effectuer de jour comme de nuit quelles que soient les conditions météorologiques. Lors d'un vol à vue, le pilote sera plus libre de sa route, mais ce vol ne pourra être réalisé que lorsque les conditions météorologiques sont bonnes.

Lors de l'atterrissage, la phase d'approche peut s'effectuer selon l'une des deux procédures (à vue ou aux instruments). Dans le cas d'un atterrissage aux instruments, la trajectoire d'approche exacte est donnée par les instruments de bords et nécessite un équipement spécial appelé ILS (*Instrument Landing System*). L'ILS

fonctionne avec deux éléments à bord de l'avion, le *localizer* et le *glide path* qui permettent respectivement de guider le pilote dans le plan horizontal (selon l'axe de la piste) et vertical (dans le plan de descente). L'utilisation de l'ILS assure de conserver des marges de franchissement d'obstacles prédéfinies (distance entre l'avion et le sol) permettant au pilote de se diriger vers la piste en toute sécurité.

L'atterrissage à vue s'effectue sans l'ILS, en utilisant principalement les repères visuels disponibles dans l'environnement. Nous listerons de façon détaillée les différentes informations visuelles utiles au contrôle de la phase d'approche à vue dans le chapitre suivant. L'approche à vue vers une piste peut être réalisée en suivant différentes trajectoires. La manœuvre la plus courante consiste à suivre le circuit de piste (cf., Figure 1.1) ou à intercepter celui-ci durant l'étape de base. Pour se placer sur la trajectoire d'approche, le pilote devra ensuite effectuer un virage d'alignement lui permettant de se positionner sur l'axe de la piste. Après ce virage, le pilote se trouve en phase d'approche finale, généralement à une distance de 2 kilomètres de la piste et doit se diriger vers celle-ci en suivant un plan de descente particulier (ou pente d'approche, cf., paragraphe suivant). Cette configuration d'approche est la plus courante et a été utilisée pour réaliser les travaux expérimentaux présentés dans les chapitres 4 et 5. Enfin, dans certains cas, le pilote peut effectuer une approche en longue finale qui consiste à placer l'avion dans l'axe de la piste très loin de celle-ci. Ce sont les conditions de visibilité qui détermineront formellement le début de l'approche en longue finale, ce qui, par temps clair avec une bonne visibilité, peut aller jusqu'à une vingtaine de kilomètres de la piste. Il est à noter que cette situation ne représente qu'une faible proportion d'atterrissages.

La pente d'approche

La pente d'approche se définit par un angle par rapport au sol et s'exprime en degrés ou en pourcentage. Actuellement, l'angle d'approche moyen en vigueur sur les aérodromes se situe généralement autour de 3° ce qui correspond à une pente d'environ 5% (i.e., pour une distance parcourue de 100 mètres, la variation d'altitude sera de cinq mètres). Un angle de 3° permet de respecter les performances générales des avions. De plus, le fait que tous les avions utilisent la même pente d'approche accroît la sécurité en permettant aux pilotes de garder un contact visuel avec les autres appareils en approche. Le point d'origine de cet angle est appelé point de visée (ou *aimpoint*) et se matérialise sur la piste par deux grandes bandes blanches. Autrement dit, le point de visée est l'endroit vers lequel le pilote doit théoriquement se diriger pour poser l'avion. Il est placé entre 200 et 400 mètres après le début de la piste pour laisser une marge de manœuvre si d'aventure la trajectoire d'arrivée

était un peu trop courte par rapport au point de visée initial.

Selon la configuration du terrain précédant la piste d'atterrissage, la valeur de la pente d'approche peut diminuer ou augmenter (entre 2.5° et 5.5°). Lorsque la procédure d'approche de l'aérodrome oblige le pilote à atterrir en suivant une pente inférieure à 3° , la trajectoire doit permettre à celui-ci d'avoir une bonne vision de la piste et de conserver une marge de sécurité suffisante pour franchir les obstacles éventuels. Lorsque la procédure d'approche impose une descente plus raide ($>3.5^\circ$), le facteur principal à prendre en compte concerne les capacités d'action de l'appareil. Cette situation se retrouve principalement dans les zones montagneuses ou d'autres environnements contraignants tels que les aéroports situés en zone urbaine. Par exemple, l'approche sur l'aéroport de Londres s'effectue à un angle de 5.5° et seuls les avions disposant de la certification d'approche à forte pente sont autorisés à se poser. Pour avoir cette certification, l'appareil doit passer des tests et démontrer qu'il est capable d'atteindre un angle de 7.5° correspondant à l'angle cible plus une marge de sécurité de 2° . Le cas d'un angle de pente très prononcé présente plusieurs risques structurels pour l'appareil. En effet pour diminuer radicalement le taux de descente, le pilote devra effectuer un arrondi brutal pouvant être très contraignant pour la voilure. Malgré cela, si le taux de descente reste trop élevé après l'arrondi, l'avion peut subir un atterrissage violent mettant en péril le confort de l'équipage et des passagers. De plus, les contraintes excessives subies lors du contact avec le sol peuvent endommager, sans que cela ne soit visible, la structure de l'appareil. Ce type de dommages serait à l'origine du plus grave accident aérien impliquant un seul avion. Lors d'un vol reliant Tokyo Haneda à Osaka, l'avion a perdu sa dérive en vol et s'est écrasé trente minutes plus tard faisant plus de 500 victimes. La cause probable de cet accident serait une réparation défectueuse suite à un précédent atterrissage ayant détérioré l'arrière de l'avion.

Les systèmes lumineux d'indicateurs de pente

Pour aider les pilotes lors de la phase d'approche, il existe des dispositifs lumineux dont la fonction est d'indiquer au pilote si la trajectoire de l'appareil est dans un plan de descente plus ou moins pentu en référence au plan de descente normal. Tous les aérodromes ne sont pas équipés de ce genre d'instrumentation. Ces dispositifs équipent généralement les pistes dont la phase d'approche comporte des risques particuliers tels que le survol d'une étendue d'eau, d'un terrain sans sources lumineuses la nuit ou lorsque la piste est située dans un endroit relativement escarpé (Figure 1.2).

Il existe différents types de systèmes lumineux. Dans un souci de clarté, nous



FIGURE 1.2 – A gauche, l’aéroport Juancho E. Yrausquin, Saba (Antilles néerlandaises). La piste est très courte et entourée par la montagne d’une part, et des falaises d’autre part. A droite, l’aéroport du Kansai, Osaka (Japon) construit sur une île artificielle en 1994. La phase d’approche s’effectue en survolant la mer.

présenterons uniquement le PAPI (*Precision Approach Path Indicator*), système utilisé au cours de nos expériences. Ce choix est basé sur le fait que le PAPI est le système le plus répandu et qu’il a fait l’objet d’une normalisation par l’Organisation de l’Aviation Civile Internationale (OACI). Le système PAPI standard est composé d’une rampe de quatre unités lumineuses alignées perpendiculairement et si possible du côté gauche de la piste (des deux côtés pour les pistes militaires). Cette rampe est installée à 15 mètres du bord de piste et à une distance variant entre 200 et 400 mètres à partir du début de la piste. Les lumières sont visibles de jour comme de nuit à une distance minimale de 7500 mètres (Figure 1.3).

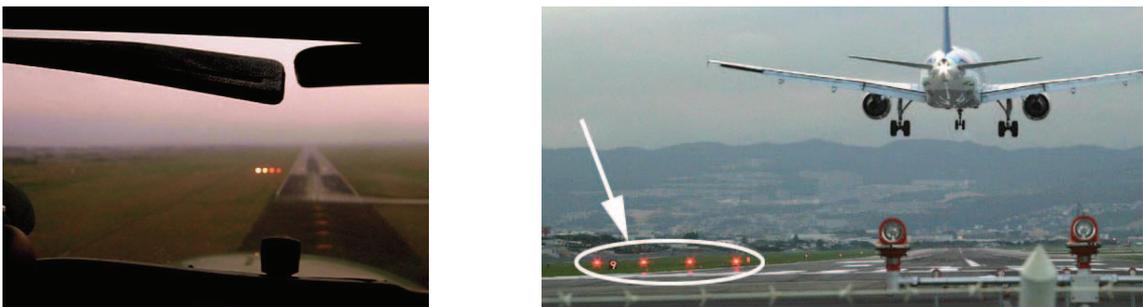


FIGURE 1.3 – Le PAPI (*Precision Approach Path Indicator*) est un système lumineux d’aide à l’atterrissage composé de quatre unités lumineuses positionnées au niveau du point de visée.

Lorsque le pilote est situé sur le plan de descente, les deux unités lumineuses les plus proches de la piste émettent une lumière rouge et les deux autres une lumière blanche (Figure 1.4). Si le pilote s'éloigne du plan de descente vers le bas, il voit trois lumières rouges et une lumière blanche puis quatre lumières rouges si l'écart par rapport au plan est vraiment important. Si le pilote s'éloigne du plan vers le haut, il voit une lumière rouge et trois lumières blanches puis, encore plus haut, quatre lumières blanches. Le PAPI permet donc de donner au pilote une information qualitative en lui indiquant la nature des régulations à produire pour se positionner par rapport au plan de descente et une information quantitative en lui indiquant l'écart qui le sépare de ce plan.

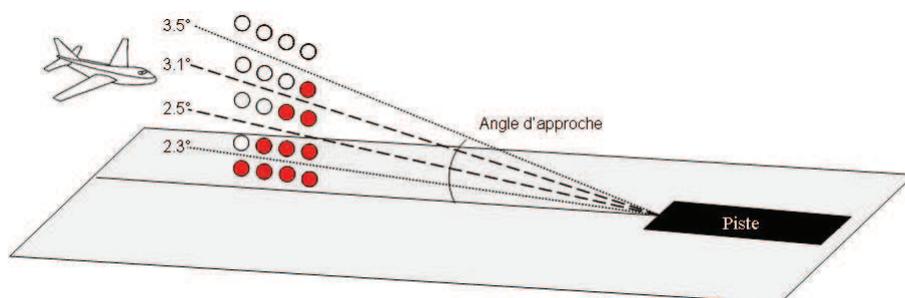


FIGURE 1.4 – Représentation schématique des codes couleurs du PAPI (*Precision Approach Path Indicator*). Grâce à différentes combinaisons de lumières rouges et blanches, le PAPI donne une information sur la position de l'avion par rapport au plan de descente. Deux lumières rouges et deux lumières blanches indiquent au pilote qu'il est situé sur le plan de descente. Plus il y a de lumières blanches, plus le pilote est haut par rapport à ce même plan et plus il y a de lumières rouges, plus il est bas.

Le fonctionnement du PAPI repose sur une lentille placée devant chaque unité lumineuse. En effet, les lampes émettent à la fois la lumière rouge et blanche, le rôle de la lentille étant de dévier la lumière pour rendre visible la bonne couleur en fonction de la position de l'avion par rapport au plan de descente. La transition entre la lumière rouge et blanche se fait de façon franche permettant ainsi de donner une information claire et précise au pilote.

1.1.3 L'arrondi

Au moment de rentrer en contact avec le sol, la vitesse verticale de l'avion est généralement trop élevée pour assurer un atterrissage en douceur. La dernière étape de l'atterrissage consiste donc à effectuer une manœuvre appelée l'arrondi (ou *landing flare*) dont le but est de diminuer le taux de descente de l'avion. Pour ce faire, le

pilote tire le manche de l'appareil afin d'augmenter l'angle d'attaque (angle entre la direction du déplacement et le nez de l'avion) et ainsi diminuer le taux de descente. Il est important d'initier cette manœuvre au bon moment. En effet, un arrondi déclenché trop tard peut provoquer un atterrissage brutal et endommager la structure de l'appareil, tandis qu'un arrondi anticipé va faire planer ou reprendre de l'altitude à l'avion. Cela aura pour conséquence de retarder le moment du toucher et peut conduire à une sortie de piste si l'avion ne dispose pas d'une distance suffisante pour freiner.

Malgré la technologie développée à bord des avions, la capacité d'un pilote à initier l'arrondi au bon moment dépend essentiellement de la vision et des repères extérieurs. Les résultats d'une enquête réalisée par questionnaire auprès de différentes populations de pilotes (débutants, experts, instructeurs) par Benbassat et Abramson (2002) montrent que 85% des pilotes utilisent la vision pour déterminer le moment auquel l'arrondi doit être initié. Actuellement, deux stratégies de déclenchement de l'arrondi sont décrites dans la littérature (Mulder, Pleijssant, van der Vaart, & van Wieringen, 2000; Grosz, Rysdyk, Bootsma, Mulder, Van Der Vaart, & van Wieringen, 1995). La première consiste à déclencher l'arrondi à une altitude constante. En pratique cela se traduit par une initiation de l'arrondi lorsque l'image angulaire de la piste sur la rétine atteint une valeur critique. Cependant, cela présente l'inconvénient (1) de ne pas tenir compte de la vitesse d'approche de l'avion et (2) d'être dangereux si le pilote se pose sur une piste dont les dimensions ne lui sont pas familières (e.g., plus large ou plus fine). La seconde méthode, plus efficace, consiste à déclencher l'arrondi en utilisant un temps de pré-contact constant (cf., Lee, 1976). Le temps de pré-contact est défini comme le temps restant avant le contact entre un individu et une surface. Une telle stratégie permet de prendre en compte la vitesse d'approche pour déclencher l'arrondi dans les meilleures conditions possibles.

1.2 Pourquoi s'intéresser à la phase d'atterrissage ?

1.2.1 Atterrissage et accidentologie

Selon le Bureau d'Enquêtes et d'Analyses (BEA) pour la sécurité de l'aviation civile, un accident aérien est un « événement se produisant 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 : (1) une personne est mortellement ou grièvement blessée (...) (2) l'aéronef subit des dommages ou une rupture structurelle (...) (3) l'aéronef a disparu

ou est totalement inaccessible ». Bien que cette définition assez générale regroupe l'ensemble des étapes liées au déroulement d'un vol, différents rapports indiquent que le décollage et l'atterrissage sont les manœuvres les plus dangereuses. Une étude publiée par Boeing (2010) sur les vols commerciaux ayant eu lieu entre 2000 et 2009 montre que le décollage et la phase de montée initiale correspondent à 21% des accidents mortels alors qu'elles ne représentent que 2% du temps de vol total. L'atterrissage s'avère tout aussi périlleux en totalisant 34% des accidents mortels alors qu'il ne représente que 4% du temps de vol (Figure 1.5). Cette tendance s'accroît clairement lorsque l'on considère l'ensemble du transport aérien. Ainsi, l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale rapporte pour l'année 2008 que 50% des accidents mortels survenus en transport régulier dans le monde ont eu lieu au cours des phases d'approche ou d'atterrissage et comptent pour 36% des décès de passagers recensés.

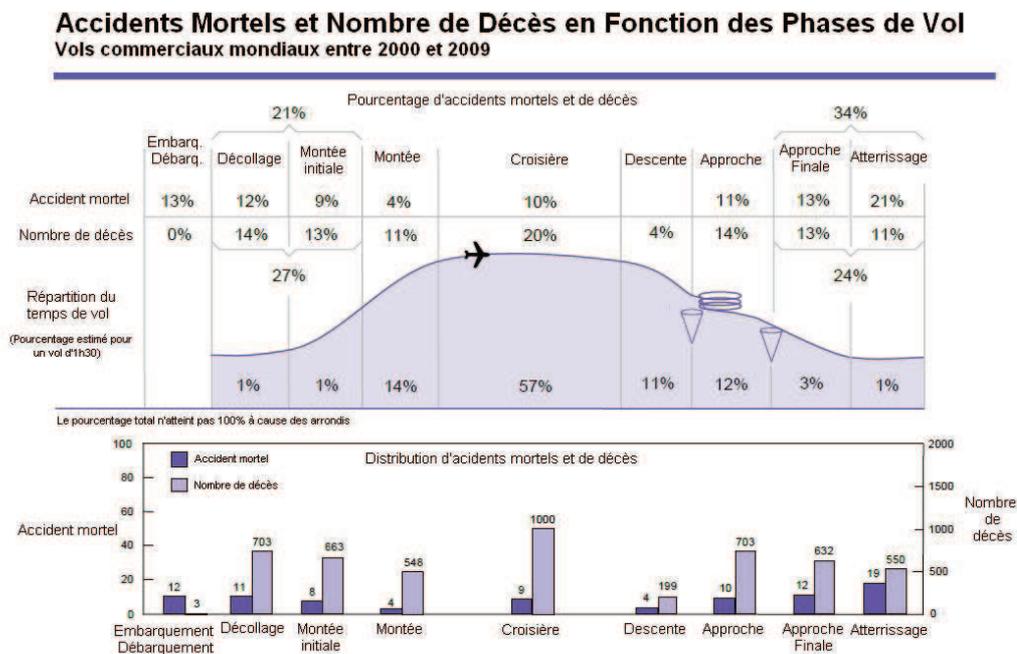


FIGURE 1.5 – Répartition des accidents d’avion entre 2000 et 2009 selon les différentes phases de vol (d’après Boeing, 2010).

A titre de comparaison, le vol de croisière compte pour plus de la moitié du vol (57%) mais ne représente que 10% des accidents mortels. Ces statistiques illustrent

bien la difficulté et la dangerosité de l'atterrissage et corroborent les impressions ressenties par les pilotes. Benbassat et Abramson (2002) ont demandé à une population de 134 pilotes comprenant des novices (30 heures de vol), des débrouillés (180h) et des experts (780h) quelle était pour eux la phase de vol la plus difficile. Les résultats montrent qu'indépendamment du niveau de pratique, les pilotes considèrent tous l'atterrissage comme la manœuvre la plus difficile et la plus dangereuse.

Afin de décrire les accidents survenant lors de l'atterrissage de façon standardisée, l'OACI a adopté une typologie composée de différents descripteurs permettant de les catégoriser. La Figure 1.6 montre que la raison principale des accidents mortels survenus dans le monde entre 2002 et 2006 est liée aux impacts sans perte de contrôle de l'appareil.

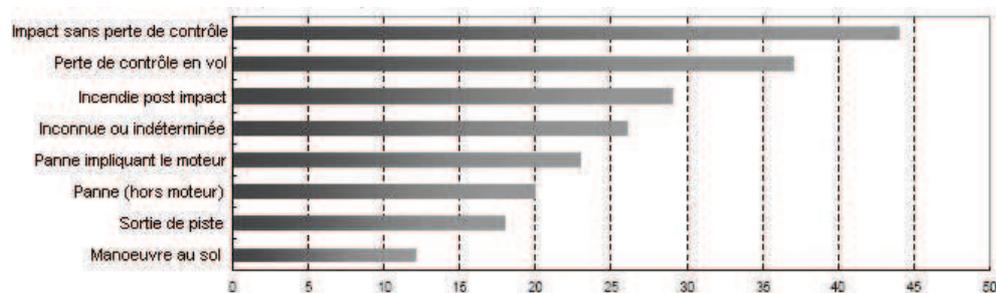


FIGURE 1.6 – Typologie des accidents aériens survenus dans le monde entre 2002 et 2006 (hors travail aérien et vols d'Etat). Les impacts sans perte de contrôle de l'appareil apparaissent comme la cause principale d'accident (d'après la Direction Générale de l'Aviation Civile, 2008).

L'impact sans perte de contrôle est défini comme un événement au cours duquel un aéronef en vol contrôlé est conduit de manière inopinée contre le relief, l'eau ou un obstacle. En d'autres termes, les pilotes contrôlent totalement l'avion mais perçoivent probablement de manière approximative la situation dans laquelle ils se trouvent. Ces accidents se produisent principalement lors des phases d'approche et d'atterrissage et peuvent être liés à une mauvaise estimation de l'altitude et/ou de l'angle d'approche.

1.2.2 Atterrissage et perception visuelle

Lorsqu'il est en vol, le pilote peut s'appuyer sur les informations disponibles dans l'environnement extérieur telle que la ligne d'horizon pour s'orienter. De même,

lorsque la visibilité est réduite, il peut par exemple se référer aux instruments de bord (altimètre, gyroscope). Ainsi, dans l'immense majorité des cas, le pilote dispose d'informations précises lui permettant de percevoir correctement la réalité. Pourtant, lorsque certaines conditions sont regroupées, le pilote peut avoir une perception erronée de la position et du mouvement de l'avion par rapport à la surface de la terre (Gillingham, 1992). En aéronautique, ce phénomène est appelé la désorientation spatiale. Contrairement à un incident mécanique qui laisse souvent le temps au pilote de trouver une solution, la désorientation spatiale présente le danger potentiel de ne pas être perçue consciemment par le pilote. Ces situations conduisent parfois à l'accident sans même que l'équipage ne soit conscient de la tragédie en cours. Il n'est donc pas étonnant de constater que la désorientation spatiale est un phénomène largement étudié. Gibb, Gray et Scharff (2010) recensent 17 études entre 1947 et 2008 visant à comprendre les accidents liés à ce phénomène.

Il est possible de classer les phénomènes de désorientation spatiale selon leurs conséquences opérationnelles ou bien selon leur origine perceptive (cf., Mars, 2001 pour une revue). Afin de circonscrire les limites de notre travail, nous présenterons uniquement les phénomènes de désorientation spatiale d'origine visuelle car ce sont les plus fréquents lors de l'atterrissage et notamment de la phase d'approche. Ces illusions perceptives peuvent se produire de jour comme de nuit. Par exemple, la configuration du terrain survolé pendant la phase d'approche peut influencer la perception de l'altitude par le pilote. La Figure 1.7 montre un pilote ayant l'habitude d'effectuer une approche en survolant des arbres d'une certaine hauteur.

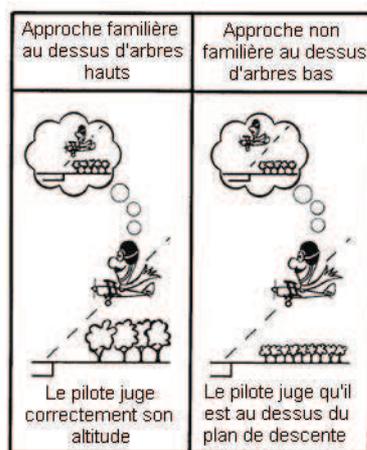


FIGURE 1.7 – La présence d'objets dont la taille est connue peut influencer l'estimation de la pente d'approche lors du survol d'un terrain qui n'est pas familier (d'après Watson, 1992).

Lorsque ce même pilote réalise une approche sur une autre piste en survolant des arbres plus petits il pourra avoir l'impression de voler au dessus du plan de descente. Le pilote corrigera alors sa trajectoire en réduisant son altitude et en s'éloignant du plan de descente l'amenant alors à voler dangereusement bas.

D'autres caractéristiques du terrain, telles que l'inclinaison de la piste ou du terrain précédant la piste, sont connues pour influencer le pilote dans son évaluation de l'altitude (Figure 1.8). Le panneau central montre une vue simplifiée d'une approche effectuée au-dessus d'un terrain plat. Dans le cas où le pilote réalise une approche au dessus d'un terrain descendant (panneau de gauche), celui-ci pourra avoir l'impression de voler sous le plan de descente et ainsi corriger sa trajectoire en volant au-dessus du plan de descente désiré. Ces conditions peuvent conduire à un atterrissage brutal. L'effet inverse pourra se produire en survolant un terrain ascendant (panneau de droite). Le pilote aura tendance à voler sous le plan de descente augmentant ainsi les risques de collisions avec des bâtiments ou des objets au sol (antenne, immeuble, arbre, colline).

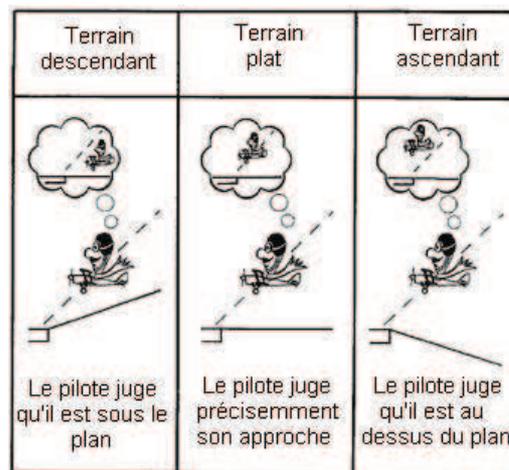


FIGURE 1.8 – La configuration du terrain précédant la piste d'atterrissage peut influencer l'estimation de la pente d'approche. Le panneau central montre une vue simplifiée d'un atterrissage réalisé au-dessus d'un terrain plat. Le panneau de gauche montre qu'un terrain descendant peut donner l'impression au pilote d'être trop bas. A l'inverse, le panneau de droite montre qu'un terrain ascendant peut donner l'impression au pilote d'être trop haut (d'après Watson, 1992).

Les épisodes de désorientation spatiale peuvent aussi avoir lieu la nuit ou lorsque la visibilité est réduite par la pluie ou le brouillard. L'un des phénomènes les plus

courants est l'illusion du trou noir (ou *Black Hole Illusion*, cf., Gibb, 2007). Cette illusion se produit principalement de nuit, lors de phases d'approches réalisées dans des conditions où l'environnement visuel est très appauvri, comme le survol d'une étendue d'eau ou de zones sombres. Dans ce cas, l'absence de repères sur le sol pendant un atterrissage peut créer l'illusion que l'avion est à une altitude plus élevée qu'il ne l'est réellement. En conséquence, le pilote va rectifier sa trajectoire d'approche en descendant sous le plan de descente, risquant ainsi de percuter des bâtiments ou de rentrer en collision avec le sol avant la piste.

L'aéroport de La Guardia à New York (Figure 1.9) regroupe l'ensemble des conditions propices à ce genre d'illusion, comme en attestent les trois accidents survenus en 1952, 1959 et 1996.



FIGURE 1.9 – Aéroport de La Guardia à New York. Les deux pistes sont très courtes (2100 mètres) et ne peuvent donc accueillir que des avions de taille moyenne (Airbus A320, Boeing 737). Sur les quatre circuits d'atterrissage possibles, trois s'effectuent en survolant l'étendue d'eau.

Dans tous les cas, l'équipage était expérimenté (entre 10 000 et 28 000 heures de vol) et connaissait déjà l'aéroport. Les avions étaient en parfait état et les rapports d'accidents établis par la *National Transportation Safety Board*¹ (NTSB) montrent que les instruments de bords fonctionnaient correctement. Lors du dernier accident, la piste était même équipée d'un système lumineux d'aide visuelle à l'atterrissage. Malgré cela, les trois équipages ont réalisé une approche sous le plan de descente, conduisant les appareils à s'écraser au début de la piste ou à plusieurs centaines de mètres de celle-ci (la plus grande distance relevée entre le lieu du crash et le début de la piste étant de 1.5 km en 1959). Ces accidents ont eu lieu de jour avec des conditions

1. Bureau américain d'enquêtes et d'analyses des accidents de transports.

météorologiques favorables (1952) ou bien de nuit en présence de brouillard et de pluie (1959, 1996) et ont comme point commun une phase d'approche ayant été effectuée en survolant le plan d'eau. Bien que la désorientation spatiale d'origine visuelle ne puisse être retenue comme l'unique cause de ces accidents, les rapports d'enquêtes mettent en avant que l'effet combiné de conditions visuelles détériorées (e.g., pluie ou brouillard) et du survol d'une zone sans repères visuels distincts (e.g., plan d'eau) semble avoir conduit les pilotes à mal apprécier leur altitude et la distance les séparant de la piste, provoquant ainsi une descente prématurée.

1.2.3 Atterrissage et formation

L'atterrissage apparaît comme une des phases de vol les plus dangereuses. Les statistiques révèlent que la moitié des accidents aériens se produisent lors de cette manœuvre. La plupart du temps (>75%) ces accidents sont attribués à des erreurs humaines (Gray, 2006) pouvant être provoquées par une perception erronée de la position de l'appareil. Comme le montrent les données présentées précédemment, les accidents touchent aussi bien les pilotes débutants que les experts. La nécessité d'améliorer la formation initiale et continue des pilotes en comprenant les mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent le contrôle de la trajectoire d'approche constitue donc un challenge de premier ordre dans le cadre de la sécurisation des activités de pilotage.

En effet, il est toujours surprenant de constater que les accidents aériens peuvent se produire alors que les instruments de bord étaient fonctionnels et permettaient au pilote d'avoir une mesure précise de l'altitude. La raison est qu'en pratique, les pilotes ne consultent pas systématiquement les instruments (e.g., l'altimètre) lors de l'atterrissage. En effet, pendant l'atterrissage, le pilote doit mener de front plusieurs tâches (communication avec la tour de contrôle, réglages des volets, des réacteurs...) et la charge de travail s'avère être très élevée. Afin de pouvoir mener à bien l'ensemble de ces opérations, le pilote choisit alors de contrôler visuellement la trajectoire de l'appareil en s'aidant des repères visuels extérieurs. Comme nous l'avons vu précédemment, c'est à ce moment là, si les conditions nécessaires sont regroupées, que le pilote peut se tromper dans la perception de l'altitude de l'avion. Cette remarque souligne l'importance de parvenir à une meilleure compréhension des repères visuels extérieurs disponibles pour contrôler la trajectoire de l'avion, étant donné que ceux-ci seront souvent préférés aux indications données par les instruments de bord. Par ailleurs, les exemples de désorientation spatiale d'origine visuelle évoqués précédemment révèlent la difficulté de détecter, choisir et utiliser les informations visuelles pertinentes lors de l'atterrissage (voir partie 2.2 pour une revue détaillée). Cette

question est encore plus importante pour les pilotes débutants qui par exemple, lors de leur premier atterrissage en solo, considèrent l'entraînement et les consignes de l'instructeur comme les facteurs déterminants d'une manœuvre réussie (Benbassat & Abramson, 2002). Ces items arrivent avant l'utilisation du manuel de pilotage ou des instruments de bord et soulignent l'importance des premières heures de formation. De plus, au cours de la formation initiale, les séances pratiques s'effectuent toujours sur le même aérodrome entraînant ainsi des conditions d'atterrissage similaires d'une session à l'autre. Autrement dit, les pilotes sont placés dans des conditions de pratique qui varient peu et apprennent donc à atterrir en utilisant toujours les mêmes repères visuels. Ce type d'entraînement peut provoquer certaines difficultés le jour où les pilotes seront amenés à réaliser des atterrissages sur un nouvel aérodrome avec des repères visuels qui ne leur sont pas familiers. Il semble donc important de pouvoir sensibiliser les pilotes en leur apprenant à utiliser les informations utiles au contrôle de l'atterrissage quel que soit leur environnement. C'est la raison pour laquelle nous pensons qu'une réflexion menée sur les mécanismes sous-tendant la perception de l'environnement pourrait être pertinente pour compléter la formation initiale et continue des pilotes.

Prises dans leur ensemble, ces constatations nous ont conduits à tenter d'élaborer une méthode permettant d'éduquer l'attention des pilotes débutants vers les repères visuels pertinents lors de l'atterrissage. Ce travail est basé sur une série d'expériences présentées dans les chapitres 3, 4 et 5 et s'inscrit dans le cadre de l'approche écologique de la perception et de l'action développée par Gibson (1950; 1979). Cette approche ainsi que les concepts clés sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 2

Contexte Théorique

2.1 Introduction à l'approche écologique de la perception et de l'action

L'approche écologique de la perception et de l'action s'intéresse au contrôle visuel du déplacement. Gibson (1958) a lui-même défini un champ d'application relativement précis regroupant des actions telles que l'initiation, l'arrêt, le guidage d'un déplacement ou l'évitement d'obstacles et l'interception de mobiles. Cette théorie fournit donc un cadre pertinent pour étudier le contrôle visuo-moteur de l'atterrissage. Ainsi, les paragraphes suivants introduisent les fondements et les concepts clés nécessaires à la compréhension des travaux expérimentaux développés au sein de ce manuscrit.

2.1.1 Les fondements de l'approche écologique

Le système agent-environnement

L'approche écologique de la perception et de l'action se démarque des approches traditionnelles en s'opposant au dualisme agent-environnement. Il convient tout d'abord de définir ces deux vocables. Ainsi, l'agent est un terme général pouvant désigner un humain, un animal ou un robot doté d'un système perceptif et capable de produire un déplacement. L'environnement fait référence au milieu dans lequel se trouve cet agent. Ce dernier peut avoir accès à l'environnement selon plusieurs modalités (visuelle, auditive, tactile). Nous tenons à préciser que tout au long du travail qui va suivre, nous nous intéressons essentiellement à la perception visuelle de l'environnement.

L'un des postulats fondateurs de l'approche écologique est de considérer l'agent et l'environnement comme indissociables. Selon Gibson (1966), la compréhension des actions effectuées par un agent ne peut se faire qu'en référence à l'environnement dans lequel il agit. De plus, l'environnement ne peut être considéré qu'en fonction des potentialités perceptives et motrices de l'agent. Par exemple, Warren (1984) a réalisé une expérience dans laquelle des sujets de petite et grande taille devaient estimer le caractère franchissable d'une marche (i.e., selon un mode bipédique). Les résultats montrent que la hauteur maximale de franchissement était plus basse pour les sujets de petite taille que pour les sujets de grande taille (Figure 2.1). Cependant lorsque l'on exprime ces valeurs en fonction de la longueur des jambes (propriété du sujet, S) et de la hauteur de la marche (propriété de l'environnement, E), ces différences disparaissent.

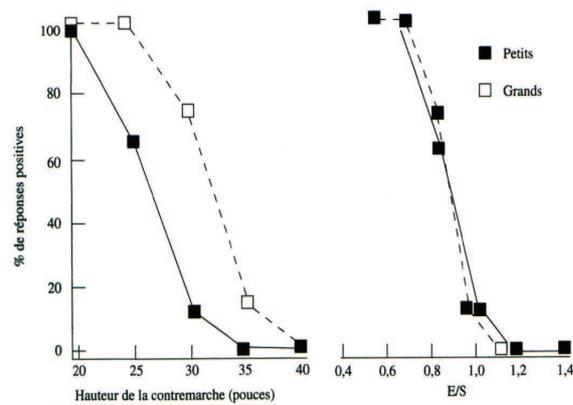


FIGURE 2.1 – Pourcentage de réponses positives formulées par des sujets de petite taille (trait noir) ou de grande taille (trait blanc) lorsqu’il leur était demandé si l’escalier pouvait être franchi sans les mains (mode bipédique). A gauche, la hauteur de la marche est exprimée selon une échelle extrinsèque (en pouces) alors qu’à droite la hauteur de marche est exprimée selon une échelle intrinsèque (rapport d’une propriété de l’environnement E sur une propriété du sujet S) (Warren, 1984).

Ce résultat montre que le jugement de la hauteur de marche par les participants ne se faisait pas en référence à une métrique extrinsèque mais plutôt à des valeurs intrinsèques liées à la morphologie de l’agent et à ses limites d’action. Cette relation très forte entre l’agent et l’environnement permet de choisir naturellement le mode d’action à utiliser et rend inutile le recours à des plans, processus calculatoires ou à une élaboration complexe interne.

Cycle perception-action

Un autre postulat central de l’approche écologique est de considérer que la perception et l’action sont indissociables et ne peuvent être étudiées séparément. Pour comprendre comment s’élaborent les comportements adaptés à l’environnement, tels que la poursuite, la fuite ou l’évitement d’obstacles, il faut concevoir la perception comme le processus par lequel l’agent va détecter les informations nécessaires au contrôle de l’action. La perception émerge de l’interaction agent-environnement. C’est seulement à travers cette interaction que le sujet peut avoir accès aux informations pertinentes du flux perceptif lui spécifiant l’état du système agent-environnement. On considère que l’action génère un flux porteur d’informations et qu’en retour la perception permet de contrôler le champ de force nécessaire

à la production du mouvement. Cette notion de causalité circulaire est appelée couplage perception-action (Kugler & Turvey, 1987) et plusieurs exemples dans la littérature montrent qu'il pourrait suffire au contrôle de l'action.

Par exemple, lorsque l'on est dans un train et qu'un autre wagon se déplace à côté, nous pouvons avoir l'impression de nous déplacer alors que notre train est à l'arrêt. Malgré les signaux vestibulaires et proprioceptifs nous indiquant que nous sommes immobiles, l'effet du flux visuel est si important que nous pouvons avoir l'illusion d'un déplacement. Ce phénomène s'appelle l'effet devection et peut parfois provoquer des modifications posturales visant à compenser le mouvement ainsi perçu. Lee et Aronson (1974) ont utilisé cet effet dans un paradigme expérimental permettant d'illustrer les liens étroits unissant la perception et l'action dans le contrôle de l'équilibre postural. Les participants étaient placés au centre d'une chambre mobile dont les murs, équipés de roulettes, étaient mus par des mouvements sinusoïdaux. Alors que la consigne était de rester debout et immobile, des réponses posturales en phase avec les mouvements de la chambre étaient systématiquement induites, traduisant ainsi un couplage fort entre la perception et l'action.

La finesse des liens entre la perception et l'action a aussi été mise en évidence à travers une méthode de décorrélation visant à tronquer la relation entre l'information perçue et l'action à produire en fonction de celle-ci. Pailhous, Ferrandez, Flückiger, et Baumberger (1990) ont ainsi montré qu'il était possible d'influencer la vitesse de marche des participants en manipulant la scène visuelle. Cette manipulation consistait à leur donner l'impression qu'ils se déplaçaient plus ou moins rapidement que leurs déplacements effectifs (voir aussi Laurent, Paul, & Cavallo, 1988; Rieser, Pick, Ashmead, & Garing, 1995). Ces données expérimentales suggèrent une priorité accordée à la vision sur la proprioception dans la gestion de l'équilibre ou la calibration de la locomotion et soulignent l'importance des liens qui unissent la perception et l'action.

Quelle conception du couplage perception-action ?

Avant d'aborder les concepts nécessaires à la compréhension des travaux de cette thèse, il convient d'apporter quelques précisions sur le niveau d'analyse théorique adopté au sein même de l'approche écologique. En effet, Bootsma (1998) propose de décomposer le couplage perception-action selon deux niveaux d'analyse : le cycle information-mouvement et le cycle perception-actuation (Figure 2.2).

Le premier niveau d'analyse, largement représenté dans la littérature (Bardy &

Laurent, 1998; Bootsma & van Wieringen, 1990; Montagne, Cornus, Glize, Quaine, & Laurent, 2000), rend compte des relations existant entre une information et le mouvement. Ce couplage situé à l'interface entre l'individu et l'environnement permet de rendre compte des principes perceptivo-moteurs qui sous-tendent la production d'une action finalisée. Ce niveau d'analyse permet notamment de mettre en évidence des lois générales appelées lois de contrôle (cf., Warren, 1988) régissant le couplage entre l'information et le mouvement. Ces lois peuvent ensuite être utilisées indépendamment du système perceptif qui est en jeu. Par exemple, il a été montré (Srinivasan, Lehrer, Kirchner, & Zhang, 1991) que les abeilles se basaient sur la vitesse de défilement optique des murs pour naviguer au sein d'un couloir étroit. Ce principe a ensuite été utilisé en robotique (Duchon, Kaelbling, & Warren, 1998) pour permettre à un véhicule autonome d'évoluer dans un labyrinthe sans jamais percuter les murs. Enfin, Duchon et Warren (2002) ont mis en évidence des similitudes entre les mécanismes de contrôle du déplacement chez l'homme et l'abeille.

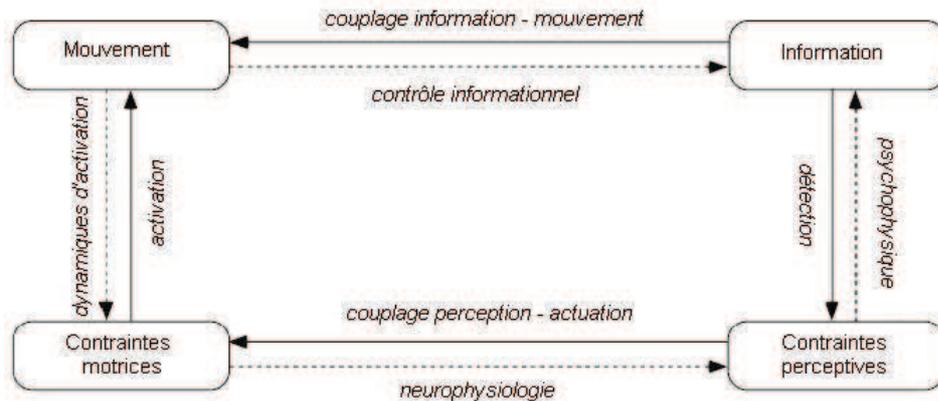


FIGURE 2.2 – Représentation des relations fonctionnelles liant l'information et le mouvement (cycle information-mouvement) et de l'implémentation neurophysiologique de celles-ci (cycle perception-actuation). Les flèches en traits pleins désignent les processus impliqués et les flèches en pointillés désignent les outils utilisés pour l'étude des processus en jeu (d'après Bootsma, 1998).

Le second niveau d'analyse (cycle perception-actuation) intègre les contraintes biomécaniques, anatomiques et neurophysiologiques impliquées dans le cycle information-mouvement. Autrement dit, les caractéristiques neurophysiologiques propres à l'agent sont prises en compte à la fois d'un point de vue perceptif et d'un point de vue moteur. L'intégration de ces différents paramètres permet notamment de fournir une modélisation précise d'une fonction donnée opérant chez un agent particulier.

Par exemple, De Rugy, Taga, Montagne, Buekers, et Laurent (2002) ont intégré ces différents paramètres afin d'établir un modèle complet du couplage perception-action dans une tâche de pointage locomoteur chez l'Homme.

Ces deux niveaux d'analyse permettent donc d'aborder la question du couplage perception-action en s'intéressant à des niveaux de modélisation différents. Le choix du niveau d'analyse dépend donc directement de l'objet d'étude. Notre objectif étant d'optimiser la relation entre l'information et le mouvement pour faciliter l'apprentissage de l'atterrissage, nous nous situons naturellement au premier niveau d'analyse. Avant de détailler l'une des notions centrales de ce travail, à savoir l'apprentissage, il nous reste à définir le concept d'information qui est central dans le cadre de l'approche écologique de la perception et de l'action.

2.1.2 Les concepts clés

Information et flux optique

L'une des pierres angulaires de la théorie de Gibson réside dans la redéfinition du concept de stimulation. En effet, l'information, telle qu'elle est définie dans les approches traditionnelles, doit être traitée par des processus calculatoires avant de pouvoir être utilisée par l'agent. A la nécessité d'établir une reconstruction du monde réel à partir de cet « enrichissement » de l'information par une élaboration complexe interne, Gibson oppose une stimulation perceptive riche, porteuse de sens pour l'action et directement accessible dans l'environnement. La définition de la stimulation que propose Gibson (1979) renvoie à une structuration de la lumière ambiante par les surfaces de l'environnement. Cette structuration serait entièrement déterminée par les lois de la physique, les surfaces qui composent l'environnement déterminant la nature même de la réflexion (i.e., intensité, angle ou encore coefficient de la réflexion). De ce fait, à chaque point d'observation correspondrait un ensemble d'angles optiques formant un patron de lumière et un seul, appelé configuration optique. Lorsque nous nous déplaçons, nous changeons constamment de point d'observation et donc de configuration optique (Figure 2.3).

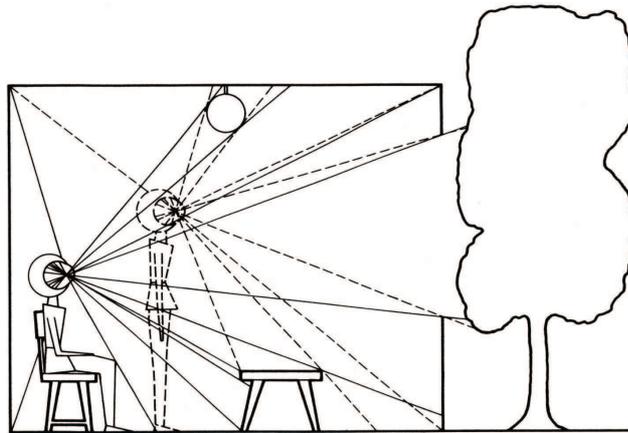


FIGURE 2.3 – Patrons de lumière ambiante ou « configurations optiques » obtenues en deux points d'observation différents (Gibson, 1979).

Pour Gibson, les changements de configuration optique au cours du temps induits par le déplacement de l'agent ou des éléments de l'environnement par rapport à lui, permettent de générer le flux optique. C'est dans ce flux optique que réside réellement l'information utile au contrôle de l'action. L'une des illustrations classiques de ce concept consiste à décrire le flux optique de façon mathématique sous la forme d'un champ vectoriel (Figure 2.4).

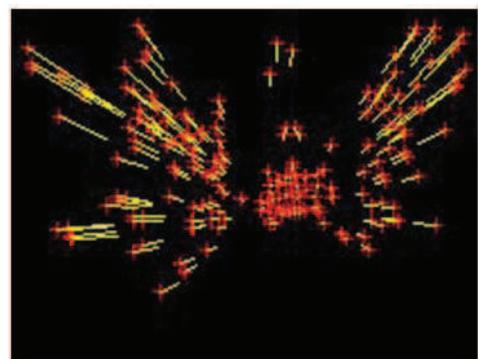


FIGURE 2.4 – L'image de gauche représente la configuration optique obtenue à un instant t à partir du déplacement d'un agent dans un couloir. L'image de droite correspond à la conversion mathématique de cette configuration optique sous la forme d'un champ vectoriel permettant de caractériser le déplacement de l'agent dans son environnement.

L'image de gauche illustre ce que perçoit une personne se déplaçant au milieu d'un couloir à un instant précis. L'image de droite montre qu'il est possible de caractériser ce même déplacement par un champ vectoriel en attribuant à chaque élément optique un vecteur doté d'une amplitude, d'une direction, et d'un sens. Le flux optique ainsi généré contient donc différentes informations permettant à l'agent de contrôler son déplacement. Par exemple, les vecteurs situés de part et d'autre du mur présentent la même amplitude. La vitesse optique de défilement des murs est donc identique à gauche et à droite. Cela nous indique que l'agent se déplace au milieu du couloir. Le flux optique contient donc de nombreuses informations permettant de renseigner l'agent sur l'état courant de sa relation avec l'environnement. De manière plus formelle, il existe des caractéristiques du flux particulières appelées invariants (Michaels & Carello, 1981).

Le concept d'invariant

La notion d'invariant traduit le fait que certains styles de changement dans le flux optique sont préservés et cela malgré les transformations continues qui caractérisent le passage d'une configuration optique à une autre. Ces invariants se décomposent en deux catégories.

Dans le premier cas, ils permettent à l'agent d'avoir accès à la composition et à l'organisation des surfaces de l'environnement. On parlera alors d'invariants structuraux. Nous avons tous expérimenté la sensation de parallaxe du mouvement (Gibson, Gibson, Smith, & Flock, 1959). Lorsqu'on se déplace à bord d'un véhicule roulant à vive allure sur l'autoroute, les éléments du paysage défilent d'autant plus vite qu'ils sont proches du point d'observation. Concrètement, la rambarde de sécurité aura une vitesse optique plus importante qu'un arbre situé à plusieurs centaines de mètres de la voiture. Cette différence de vitesse (parallaxe de mouvement) est un invariant structural permettant de déterminer l'emplacement des objets les uns par rapport aux autres.

La deuxième catégorie d'invariants correspond aux invariants transformationnels. Ces invariants sont liés de manière directe, unique et univoque à une propriété de l'environnement ou à une propriété du système agent-environnement. Ce type d'invariant est le plus couramment cité dans la littérature et renseigne l'individu sur la nature de ses déplacements dans l'environnement. Par exemple, il existe dans le flux optique un point fixe qui ne subit jamais de changement. Ce point est le foyer d'origine du champ vectoriel généré par le flux optique et spécifie la direction du déplacement. Il est appelé focus d'expansion optique (Gibson, 1979). Pour

reprenant l'illustration du couloir précédemment évoquée, le foyer d'expansion est placé sur le mur du fond, cela indique donc à l'agent qu'il se dirige vers l'extrémité du couloir. D'autres invariants transformationnels sont présents dans le flux optique. Nous pouvons notamment citer *tau* (Lee, 1976), donnant accès au temps qui sépare un objet d'une surface (temps de pré-contact), ou l'accélération optique (Chapman, 1968 ; McLeod & Dienes, 1993) indiquant si le déplacement produit par un agent lui permettra d'intercepter un mobile.

Pour l'ensemble du travail qui va suivre, nous parlerons principalement d'invariants transformationnels. De plus, il est important de préciser que ces invariants existent dans l'environnement indépendamment des systèmes perceptifs permettant de les détecter. Sur la base des différents concepts que nous venons de présenter, nous allons maintenant nous intéresser de façon plus spécifique aux variables informationnelles qui permettent de guider l'appareil lors de la phase d'approche.

2.2 Le contrôle visuo-moteur de la phase d'approche

Une fois que l'avion est aligné avec l'axe de la piste, le pilote doit réduire progressivement son altitude et sa vitesse afin de poser l'appareil en douceur. L'objectif de cette section est de présenter à travers une large revue bibliographique les variables informationnelles présentes dans le flux optique que le pilote pourrait utiliser afin de contrôler sa trajectoire d'approche lors de l'atterrissage.

2.2.1 Focus d'expansion optique et angle H

Comme nous venons de le voir, il existe un invariant dans le flux optique nommé foyer d'expansion optique (Gibson, Olum, & Rosenblatt, 1955). Ce point a la particularité d'être le seul à posséder une vitesse nulle dans le champ de flux. S'il est détecté, le foyer d'expansion optique renseigne l'agent sur la direction de son déplacement. Par exemple, dans une série de trois expériences, Warren, Morris, et Kalish (1988) manipulent la densité, la vitesse et la direction de nuages de points en mouvement. Les résultats montrent qu'à partir du flux optique ainsi généré, les participants sont capables d'estimer avec une précision de 1° à 2° la direction de leur déplacement. Le focus d'expansion optique peut donc être utilisé pour contrôler la trajectoire de l'appareil durant la phase d'approche. Ainsi, pour être assuré de se diriger vers le début de la piste, le pilote devra faire coïncider le focus d'expansion

optique avec le point de visée (Figure 2.5). En d'autres termes, le contrôle directionnel est couronné de succès si le point de visée est le seul élément de la scène visuelle qui ne subit pas de changements optiques tout au long de l'approche.

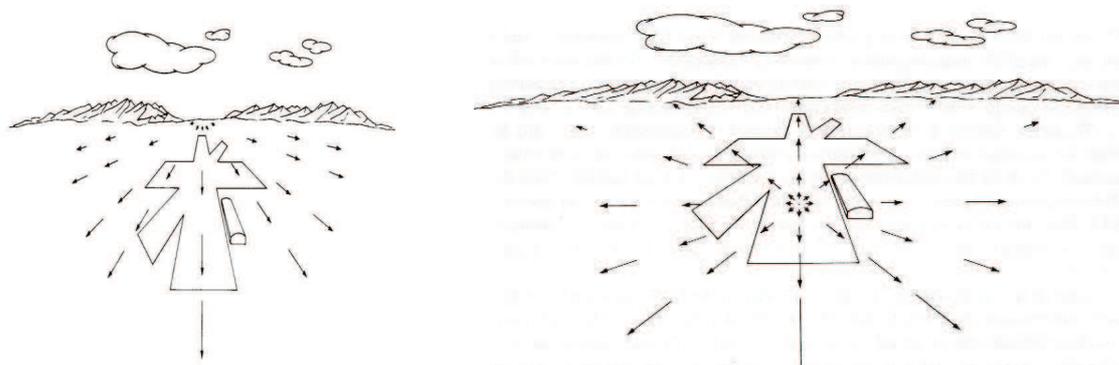


FIGURE 2.5 – Le focus d'expansion optique spécifie la direction du déplacement. L'image de gauche montre le flux optique perçu par un pilote passant au-dessus de la piste et se dirigeant en direction de l'horizon. L'image de droite représente le flux optique perçu par un pilote qui se dirige vers le point de visée situé au début de la piste d'atterrissage (d'après Gibson, 1950).

Langewiesche (1944) a émis l'hypothèse que le focus d'expansion optique ne spécifiait pas seulement le point vers lequel l'avion se dirigeait. En effet, il a montré qu'il était possible de diriger l'appareil en utilisant la distance optique séparant le point de visée de la ligne d'horizon (Figure 2.6). Plus précisément, pour adopter un angle d'approche constant, le pilote doit maintenir la distance entre le point de visée et la ligne d'horizon constante au cours du temps. Si cette distance diminue, cela indique au pilote qu'il atterrira au-delà de la piste. À l'inverse, si la distance augmente, cela lui indique qu'il se posera avant la piste. Initialement appelée distance H, cette variable informationnelle¹ est maintenant connue dans la littérature sous le nom d'angle H (Galanis, Jennings, & Beckett, 1998; 2001). Cet angle peut être défini de façon absolue (angle entre le début de la piste et l'horizon) ou relative. L'angle H relatif désigne alors l'angle sous-tendu au point d'observation par le début de la piste et un point arbitraire tel que le bord du cockpit ou le nez de l'appareil.

1. Dans la littérature, l'angle H est décrit comme un invariant qui spécifie une valeur d'angle d'approche constante vers la piste d'atterrissage. Dans la mesure où cette variable perceptive ne permet pas de spécifier la valeur précise de l'angle d'approche (e.g., 3°), nous préférons utiliser le terme « variable informationnelle ».

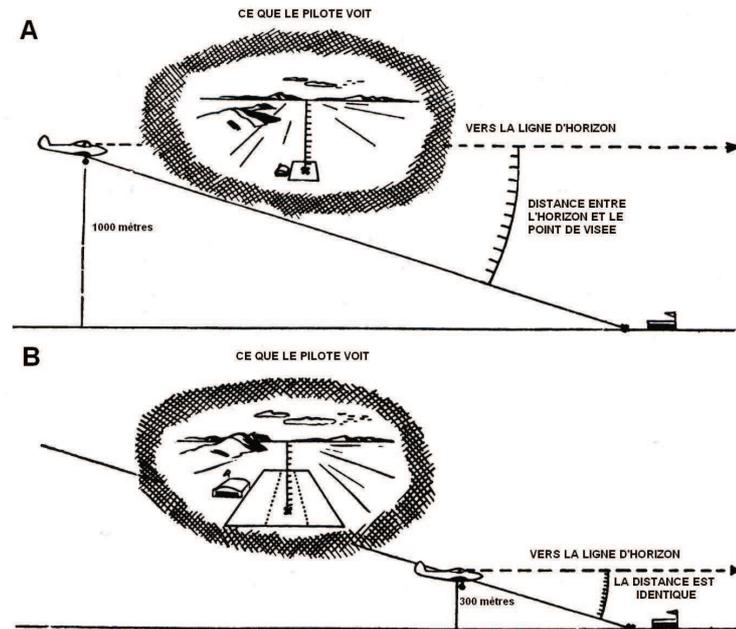


FIGURE 2.6 – La première illustration (A) montre ce que voit le pilote lorsqu'il est loin de la piste. La distance entre le point de visée et la ligne d'horizon est représentée par la réglette. Dans la deuxième illustration (B), l'avion s'est rapproché de la piste et a perdu de l'altitude. Le hangar et la piste paraissent plus grands mais la distance entre le point de visée et l'horizon reste toujours la même, indiquant ainsi au pilote qu'il maintient un angle d'approche constant (d'après Langewiesche, 1944).

Lintern et Liu (1991) ont testé l'utilisation de l'angle H absolu par les pilotes lors d'atterrissages réalisés sur un simulateur de vol. Pour cela, ils ont manipulé l'emplacement de la ligne d'horizon. En plaçant l'horizon plus haut qu'il ne l'est réellement, l'angle H augmente et donne l'impression au pilote d'être au-dessus du plan de descente. Inversement, en plaçant l'horizon plus bas qu'il ne l'est réellement, l'angle H diminue et donne l'impression au pilote d'être en-dessous du plan de descente. Les résultats montrent que les pilotes effectuent des régulations en phase avec les variations de l'horizon, suggérant ainsi que l'angle H est une variable informationnelle utilisée pour contrôler la phase d'approche.

Bien que l'utilisation de l'angle H semble être pertinente dans le cadre de l'atterrissage, cette variable informationnelle présente quelques limites qu'il est utile de préciser. En effet, l'angle H, s'il est détecté par le pilote, permet de maintenir un angle d'approche constant. Toutefois, il ne permet pas d'avoir accès à la valeur de

l'angle d'approche suivi par le pilote. En d'autres termes, même si le pilote se base sur cette variable informationnelle pour contrôler sa trajectoire d'approche, il lui reste toujours à déterminer à quel moment il doit initier la descente pour suivre une pente correspondant à 3° . Pour cela, la forme de la piste constitue par exemple, un moyen efficace pour savoir à quel moment débiter la descente vers la piste.

2.2.2 La forme de la piste

Lors de la phase d'approche, la piste d'atterrissage constitue le point visuel de référence. Cela explique que la deuxième variable informationnelle pouvant être utilisée par les pilotes réside dans les changements de forme de la piste au cours de la phase d'approche. Par exemple, la perception de la forme de la piste permet d'estimer l'alignement latéral et vertical de l'avion par rapport à celle-ci. Lors de la phase d'approche, la piste se présente sous la forme d'un trapèze (Figure 2.7). Lorsque l'avion est aligné sur l'axe de la piste, le pilote perçoit un trapèze symétrique. Quand l'avion s'écarte de l'axe de la piste, le trapèze se déforme et n'est plus symétrique.

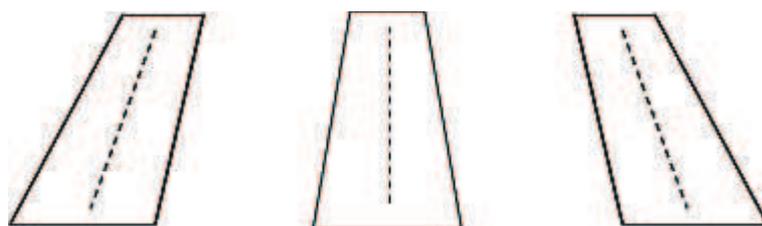


FIGURE 2.7 – Représentation d'une même piste d'atterrissage lorsque l'avion est aligné avec l'axe de la piste (au centre), décalé sur la droite (figure de gauche) ou sur la gauche (figure de droite).

Dans le cadre de la phase d'approche, nous nous intéresserons plus particulièrement à la variation verticale de la forme de la piste. Nous considérerons donc que le pilote est toujours aligné avec l'axe de la piste et qu'il perçoit celle-ci sous la forme d'un trapèze symétrique. Selon la hauteur du point d'observation, la piste peut se présenter sous différentes formes (Figure 2.8). Pour une piste donnée, une seule de ces formes correspond à un angle de 3° . Cette configuration est représentée au centre sur la Figure 2.8. De cette façon, si la piste tend vers une forme fine et rectangulaire, cela indique au pilote qu'il est au-dessus du plan de descente et si la piste tend vers une forme large et aplatie, cela indique qu'il est en dessous du plan de descente désiré. Pour résumer, la variable informationnelle "forme de la piste"

renvoie nécessairement à deux étapes. Tout d'abord, le pilote doit se positionner de façon à voir la piste selon la forme correspondant à l'angle désiré, puis il doit se diriger vers la piste en maintenant cette forme constante au cours du temps. Plus précisément, c'est l'évolution de la forme de la piste au cours du temps qui permet au pilote de savoir s'il reste sur un plan de descente constant.

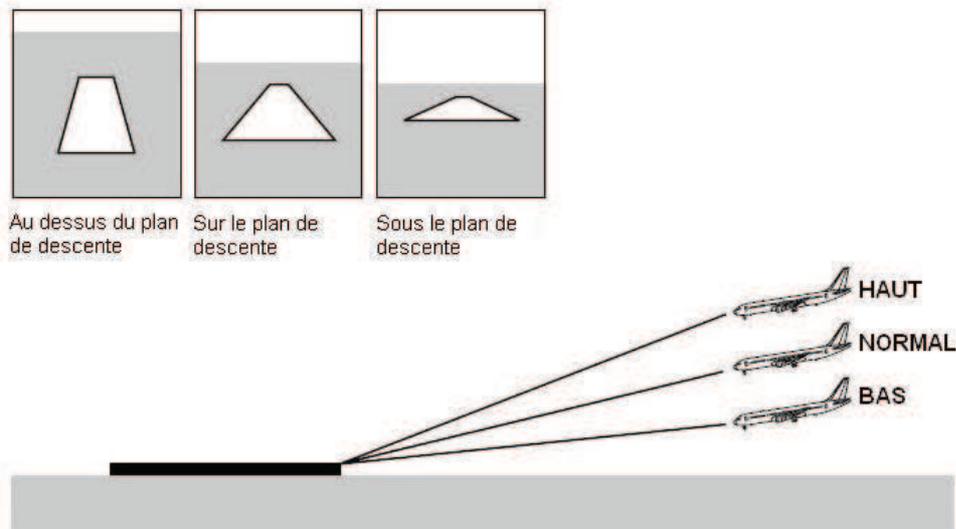


FIGURE 2.8 – Lorsque le pilote est sur le plan de descente, la piste a une forme particulière. Les variations de la forme de la piste indiquent donc au pilote qu'il passe au-dessus ou en dessous du plan de descente (d'après Wilson, 1999).

De nombreuses études (Galanis et al., 1998; 2001, Lintern & Walker, 1991; Mertens, 1981; Mertens & Lewis, 1982) ont mis en évidence le rôle de la forme de la piste et plus particulièrement du ratio longueur/largeur dans le cadre du contrôle de la trajectoire d'approche. Précisons tout d'abord que plus ce ratio est petit, plus la piste paraît large et aplatie. En la comparant à une piste standard, le pilote aura tendance à croire qu'il est sous le plan de descente. Inversement, plus le ratio est grand, plus la piste paraît fine et longue. Dans ce cas, le pilote aura tendance à croire qu'il est au-dessus du plan de descente. Cette erreur d'estimation particulière a été identifiée comme étant une source de danger importante pour les pilotes débutants (Galanis et al., 2001; Mertens & Lewis, 1982). Par exemple, Mertens (1981) ainsi que Mertens et Lewis (1982) ont manipulé la forme de la piste lors d'atterrissages réalisés de nuit. Ils ont montré qu'une piste avec un ratio important pouvait donner l'impression d'être au-dessus du plan et conduisait les pilotes à effectuer leur approche sous le plan de descente. De la même façon, Lintern et Walker (1991) ont

examiné l'influence de la scène visuelle et de la largeur de la piste sur la précision des trajectoires d'approche. La piste était déclinée en trois tailles : fine (ratio de 66), normale (ratio de 40) et large (ratio de 28). La scène visuelle était qualifiée de normale ou pauvre, sans être quantifiée. Les résultats révèlent que les participants effectuaient systématiquement des approches sous le plan de descente dans les essais où la piste présentait un ratio important et que la scène visuelle était pauvre. Cependant les résultats ne révèlent pas d'effet d'interaction entre la largeur de la piste et la scène visuelle. L'une des explications possibles de ce résultat réside dans le fait que l'horizon était disponible à tous les essais et pouvait donc constituer un repère permettant au pilote de limiter la déviation par rapport au plan de descente lorsque la richesse de la scène visuelle était manipulée. Nous aborderons plus en détail les variables informationnelles relatives à la scène visuelle dans le prochain paragraphe.

Prises dans leur ensemble, ces expériences montrent que le ratio, et plus particulièrement l'évolution de forme de la piste au cours du temps, est une variable informationnelle utilisée par les pilotes pour réguler leur trajectoire lors de la phase d'approche. Toutefois, l'utilisation de ce ratio peut être une source d'accident



FIGURE 2.9 – Piste d'atterrissage éclairé par un système de lumières d'approche (ALS) juste avant la tombée de la nuit.

potentiel lorsque le pilote se trouve dans des conditions visuelles restreintes. Par exemple, lors d'un atterrissage de nuit, la piste est éclairée à l'aide d'un dispositif lumineux ALS (*Approach Lighting System*) placé en amont de la piste, lui donnant ainsi une forme plus allongée qu'elle ne l'est réellement (Figure 2.9, ci-contre). Autrement dit, ce système augmente le ratio perçu par le pilote et peut lui donner l'impression d'être plus haut qu'il ne l'est réellement. Mertens et Lewis (1983) ont montré que dans cette situation, l'ALS conduisait les pilotes à effectuer une approche en dessous du plan de descente. Les auteurs ont aussi montré qu'en cachant la fin de la piste pour diminuer sa longueur (et donc diminuer le ratio perçu) les pilotes revenaient naturellement sur le plan désiré de 3° . Plus récemment, dans une tâche d'atterrissage réalisée sur simulateur, Gibb, Schvaneveldt, et Gray (2008) ont testé cette hypothèse en imaginant un ALS reconfiguré. Le système traditionnel était complété par de grands panneaux lumineux disposés de chaque côté de la piste. Le but de cette manœuvre était de diminuer l'illusion d'allongement pour rétablir le véritable ratio de la piste. Les résultats montrent que ce système permettait effectivement d'améliorer la précision

de la trajectoire d'approche. L'estimation de la pente d'approche peut également

être facilitée par des variables informationnelles naturellement présentes dans l'environnement. Ces variables informationnelles sont répertoriées dans le paragraphe suivant.

2.2.3 La texture du sol

La texture du sol peut être définie selon différents paramètres tels que la densité, la disposition, l'orientation et la saillance des éléments de la scène visuelle. Avant de détailler comment ces différents paramètres peuvent influencer la perception de la pente d'approche, il convient de clarifier le statut de ces variables informationnelles au regard des précédentes. En effet, si l'angle H et la forme de la piste constituent des variables à même de spécifier un angle d'approche constant, les paramètres inhérents à la texture du sol ont un rôle différent. Aucun des paramètres de texture ne peut indiquer au pilote qu'il approche selon un angle constant. Cependant, nous les présentons dans le paragraphe suivant car ils permettent (1) de renforcer la perception d'éléments sur lesquels reposent d'autres variables informationnelles (e.g., l'horizon pour l'angle H) et (2) d'informer le pilote sur la variation de son altitude. Nous avons vu par ailleurs (partie 1.1.3) que les pilotes choisissaient parfois d'estimer leur altitude sur la base d'informations visuelles plutôt qu'en utilisant l'altimètre, il semble donc évident que les paramètres de texture jouent un rôle important dans le contrôle de la phase d'approche.

Certaines propriétés du flux optique peuvent être utilisées pour renseigner l'agent sur la direction de son déplacement (Gibson et al., 1955). Le flux optique peut aussi être utilisé afin de percevoir la variation de l'altitude. La première variable informationnelle que nous présenterons ici est la vitesse globale du flux optique (*Global Optical Flow Rate* ou GOFR). GOFR correspond à la vitesse angulaire de défilement des éléments de texture (arbres, champs, voitures etc.) dans une direction donnée (Larish & Flach, 1990). GOFR est directement dépendant de l'altitude et varie en fonction de la hauteur du point d'observation. Plus le point d'observation est bas, plus la vitesse angulaire des éléments de texture est importante et inversement. Pour une vitesse donnée, les variations de GOFR au cours du temps renseignent donc le pilote sur le changement de son altitude. La variation de l'altitude sera d'autant plus grande que la variation de GOFR au cours du temps sera elle-même plus importante.

Une autre variable informationnelle peut être utilisée à partir de l'orientation des éléments de texture et repose sur la détection de deux angles particuliers : l'angle de depression et l'angle de splay (Flach, Warren, Garness, Kelly, & Stanard, 1997). L'angle de *depression* est l'angle formé au point d'observation entre l'horizon et une

ligne ou un objet dont les contours sont perpendiculaires au déplacement. L'angle de *splay* est l'angle formé au point d'observation par la direction du déplacement et un objet parallèle à la direction du déplacement (Figure 2.10). Les autoroutes, chemins de fer ou rangées d'arbres de la scène visuelle sont autant d'éléments pouvant être utilisés pour former les angles de *splay* et de *depression*.

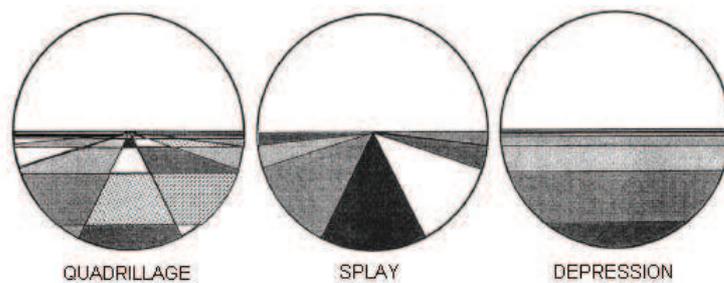


FIGURE 2.10 – La présence de lignes parallèles au déplacement permet d’avoir accès à l’angle de *splay*. Cet angle est sous-tendu au point d’observation par la direction du déplacement et un objet parallèle à ce déplacement. La présence de lignes perpendiculaires permet d’utiliser l’angle de *depression*, sous-tendu au point d’observation entre l’horizon et un repère perpendiculaire au déplacement. Enfin, une texture quadrillée permet d’avoir accès aussi bien à l’angle de *splay* qu’à l’angle de *depression* (d’après Flach et al., 1997).

L’utilisation de ces différents angles a été testée dans une tâche de maintien de l’altitude par Flach et al. (1997 ; voir aussi Flach, Hagen, & Larish, 1992). Les participants devaient voler à hauteur constante en survolant différents types de textures à différentes vitesses (cf., Figure 2.10). Pendant l’essai, les participants étaient perturbés par un vent latéral, de face ou vertical. Les perturbations latérales affectaient la perception de l’angle de *splay*, les perturbations de face affectaient la perception de l’angle de *depression* et les perturbations verticales affectaient à la fois l’angle de *splay* et de *depression*. Les résultats montrent que la performance était meilleure lorsque les participants survolaient un terrain texturé de lignes parallèles au déplacement (angle de *splay*) plutôt qu’un terrain composé de lignes perpendiculaires (angle de *depression*) ou d’un quadrillage (angle de *splay* et *depression*). Ce dernier résultat est plutôt surprenant dans la mesure où le quadrillage permet de se référer à la fois à l’angle de *splay* et à l’angle de *depression*. Les auteurs ont émis l’hypothèse que les lignes perpendiculaires de la grille introduisaient une perturbation dans la perception de l’altitude, diminuant ainsi la performance. Enfin, les auteurs montrent que la détection du changement d’altitude est facilitée par des déplacements se faisant à vitesse élevée. Une des interprétations possibles est relative au

fait que les variations d'angles sont d'autant plus rapides que la vitesse est grande et par conséquent, plus faciles à percevoir.

Ces variables informationnelles constituent donc des repères pertinents dans la perception du changement d'altitude. Cependant, en manipulant la densité et la saillance des objets de la scène visuelle, Kleiss et Hubbard (1993) ont montré que les pilotes pouvaient estimer précisément une variation d'altitude même en l'absence de ces angles particuliers. Pour cela, des objets en deux ou trois dimensions étaient placés aléatoirement sur le sol. Les résultats montrent que le jugement des participants était d'autant plus précis que les objets étaient saillants et que la densité était importante. De la même façon, Gray (2007) a montré que l'utilisation des différents angles liés à la texture (i.e., angle de *splay* et de *depression*) tendait à diminuer lorsque la scène visuelle était composée d'objets en trois dimensions. Dans une tâche de maintien de l'altitude, Gray (2007) a mis en évidence que les pilotes étaient plus performants en présence d'objets 3D répartis aléatoirement sur le sol qu'en présence d'objets 2D ou 3D répartis de manière à pouvoir utiliser les angles de *splay* et *depression*.

Prises dans leur ensemble, ces études mettent en évidence une relation directe entre les différents paramètres de la texture et l'estimation de la hauteur de vol. Comme nous l'avons expliqué précédemment, la texture permet aussi de faciliter la détection de variables informationnelles telles que l'angle H. Rappelons que cet angle, formé au point d'observation par l'horizon et le point de visée, permet de se diriger vers la piste en maintenant un angle d'approche constant. Toutefois, certaines configurations de terrain peuvent biaiser l'estimation de la ligne d'horizon. Par exemple, si la piste est suivie d'un terrain en descente ou d'une colline, le pilote ne pourra pas voir l'emplacement réel de la ligne d'horizon (horizon implicite). Autrement dit, lorsque la ligne d'horizon est faussée par un terrain ascendant, l'horizon explicite (vu par le pilote) sera plus haut que l'horizon implicite. Le pilote aura tendance à surestimer l'angle H effectuant ainsi une approche sous le plan de descente. Le phénomène inverse se produira pour un horizon faussé par un terrain descendant. Lintern et Liu (1991) ont montré que la présence de lignes parallèles au déplacement permettait au pilote de mieux estimer l'horizon implicite, réduisant ainsi les déviations par rapport au plan de descente. Enfin, Patterson et al. (2006) ont étudié le contrôle de la direction du déplacement pendant des simulations de vol à basse altitude. Les participants devaient se diriger vers un point fixe alors qu'ils étaient soumis à différents vents latéraux. Les résultats montrent que la présence d'objets en trois dimensions permettait d'augmenter significativement la précision du déplacement. Les auteurs ont aussi constaté que la performance s'améliorait en

même temps que la densité des objets augmentait.

2.2.4 Conclusions

Les variables informationnelles permettant au pilote de guider visuellement la trajectoire de son avion pendant la phase d'approche sont nombreuses. La revue de bibliographie présentée ci-dessus fait état d'un invariant (e.g., focus d'expansion optique) permettant de contrôler la direction de son déplacement et de variables informationnelles (e.g., variation de l'angle H et de la forme de la piste au cours du temps) permettant de spécifier un angle d'approche constant. Nous avons aussi montré que la texture (i.e., orientation, densité, ligne de perspective, saillance des objets) permettait de faciliter l'accès à ces variables informationnelles. Même s'ils n'ont pas le même statut, les paramètres de la texture du sol jouent un rôle important dans l'estimation du changement d'altitude. Kraft (1978) soulignait que la détection de l'altitude était un pré-requis indispensable pour suivre correctement le plan de descente. Cette hypothèse expliquerait pourquoi certaines conditions sont propices aux accidents. La nuit par exemple, les sources d'informations relatives aux changements d'altitude sont inutilisables (densité de la texture, saillance des objets) ce qui obligerait les pilotes à se référer principalement à la forme de la piste. Or, nous avons vu que les systèmes lumineux pouvaient biaiser l'estimation du ratio de la piste et conduire à des trajectoires d'approche dangereusement basses.

L'influence de la texture du sol sur la perception des autres variables informationnelles suggère que les pilotes utilisent de concert ces différentes informations pour être le plus précis possible. Récemment, Galanis et al. (1998; 2001) ont mis au point un modèle mathématique de la phase d'approche reposant sur la prise en compte des différentes variables informationnelles (angle H, ratio de la piste). Sur la base de leur premier modèle (Galanis et al., 1998) les auteurs expliquent que ces variables informationnelles sont utilisées en même temps mais ont une importance différente en fonction de la distance séparant le pilote de la piste. Par exemple, l'angle H serait plus facile à percevoir en étant loin de la piste tandis que la forme de la piste serait plus utilisée lorsque le pilote est proche de celle-ci. Après avoir décrit les principales variables informationnelles permettant le contrôle visuel de la phase d'approche, nous allons maintenant nous intéresser aux mécanismes perceptifs qui sous-tendent la détection et l'utilisation de celles-ci.

2.3 L'apprentissage des habiletés perceptivo-motrices

Jusqu'à présent, nous nous sommes intéressés (1) aux mécanismes permettant à un agent de produire un comportement adapté dans le cadre d'une action finalisée et (2) aux différentes variables informationnelles permettant à l'agent de contrôler son action. Notre objectif était de présenter les préceptes sous-tendant le contrôle et la production du mouvement. En revanche, l'objectif de la présente partie est de présenter les connaissances actuelles dans le domaine de l'apprentissage perceptivo-moteur en vue de comprendre comment un agent apprend une tâche nouvelle ou devient plus performant dans une tâche particulière. Autrement dit, nous nous focaliserons sur les mécanismes qui permettent l'acquisition et la construction de nouvelles habiletés.

Quel que soit le domaine considéré, on observe un apprentissage « à partir du moment où un organisme, placé plusieurs fois de suite dans la même situation, modifie sa conduite de façon systématique et durable » (Reuchlin, 1977). Cette définition met l'accent sur l'aspect temporel des changements qui s'opèrent et sur le fait que l'apprentissage ne se réduit pas à l'amélioration de la performance. La performance se mesure à un instant précis de la pratique et peut être influencée par différents facteurs tels que la fatigue, le stress, le niveau de motivation. Lorsque l'on s'intéresse à l'acquisition ou à l'amélioration d'une nouvelle habileté, il est donc nécessaire de distinguer les changements comportementaux temporaires et durables. En d'autres termes, l'apprentissage ne peut être appréhendé qu'au travers de la présence d'effets à long terme de la pratique sur le niveau de performance. L'observation de telles modifications se fait au moyen de tests de rétention et/ou de transferts décalés dans le temps (Salmoni, Schmidt, & Walter, 1984). Un test de rétention permet d'évaluer la persistance d'une amélioration de la performance, tandis qu'un test de transfert permet de mesurer la généralisation de l'apprentissage à un contexte différent de celui dans lequel le participant a appris à faire la tâche.

La thématique de l'apprentissage peut recouvrir de nombreux champs différents. Cependant, l'acquisition d'une habileté perceptivo-motrice ne se fait pas de la même manière que l'apprentissage d'une langue étrangère ou d'un théorème de mathématique. Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons donc de manière spécifique à l'apprentissage perceptivo-moteur. Pour cela, il faut savoir qu'une conception de l'apprentissage repose nécessairement sur une théorie du contrôle moteur. Il existe actuellement plusieurs approches théoriques, chacune offrant une définition de l'apprentissage perceptivo-moteur qui lui est propre. Parmi celles-ci, nous souhaitons définir brièvement l'approche cognitive du contrôle moteur puisque nous y ferons ensuite référence en présentant les outils permettant d'améliorer l'apprentis-

sage (cf., partie 2.4). Nous livrerons ensuite une vision détaillée de l'apprentissage perceptivo-moteur au regard de notre cadre théorique de référence, c'est-à-dire l'approche écologique de la perception et de l'action.

2.3.1 L'approche cognitive de l'apprentissage

Le fondement de l'approche cognitive repose sur le fait que les relations entre la perception et l'action sont médiées par des structures prescriptives (représentations, plans, programmes moteurs) stockées au niveau central (mémoire). L'approche cognitive repose donc sur le concept de programmation motrice dans lequel le programme moteur généralisé (PMG) est une notion clef (Schmidt, 1975). Le PMG s'intègre dans la théorie des schémas² développée par Schmidt (1975) et correspond à une catégorie de mouvements caractérisée par une identité de structure. Autrement dit, un PMG regroupe un ensemble de mouvements qui partagent un patron commun.

Selon l'approche cognitive du contrôle moteur, la production du mouvement repose sur trois phases distinctes. Tout d'abord, l'agent sélectionne un plan d'action sous la forme d'un PMG. Ensuite, il va spécifier certains paramètres du PMG (amplitude, vitesse, durée) afin d'adapter le mouvement aux exigences de la tâche. Cette sélection se fait en fonction de l'analyse des conditions initiales et du but à atteindre. Le PMG génère ainsi des commandes motrices structurées spatialement et temporellement afin de produire des mouvements coordonnés. Enfin, l'agent corrigera ses erreurs sur la base des informations sensorielles afférentes. De ce fait, l'apprentissage est structuré par le décalage entre le mouvement produit et le résultat attendu. L'erreur a donc un statut positif puisqu'elle permet à l'agent d'apprendre.

A l'issue de la production du mouvement, le système nerveux central stocke en mémoire les conditions initiales, (position du corps, poids), les paramètres du PMG (force, vitesse, durée), les conséquences sensorielles du mouvement et le résultat de l'action. Au cours de l'apprentissage, le système nerveux construit des relations et des règles entre ces différents paramètres dans le but d'optimiser le processus de traitement de l'information qui sous-tend la production du mouvement. Autrement dit, l'agent apprend à mettre en relation les informations dont il dispose avant, pendant et après la production du mouvement avec les conséquences de ce même mouvement afin d'optimiser la paramétrisation des PMG. Dans cette perspective,

2. Le schéma est envisagé comme étant la relation entre les conséquences de l'exécution d'un Programme Moteur Généralisé et les paramètres optés pour sa réalisation. Le lecteur pourra se référer aux travaux de Schmidt (1975) pour plus de détails.

l'apprentissage s'effectue en manipulant la disponibilité des informations lors des différentes phases du mouvement (connaissance du résultat ou de la performance, présentation de modèles) ou en aménageant les conditions de pratique (quantité et distribution des répétitions, variabilité de la pratique). Comme nous l'avons précisé précédemment, nous reviendrons sur les méthodes permettant d'améliorer l'apprentissage dans la partie suivante. Une grande partie de la communauté scientifique adhère à cette conception de l'apprentissage, ce qui fait d'elle l'une des plus abouties et des plus reconnues (Magill, 2004; Schmidt & Lee, 2005). Nous proposons maintenant de nous intéresser à la conception écologique de l'apprentissage. Cette approche constitue notre cadre théorique de référence, c'est pourquoi nous livrerons une description beaucoup plus détaillée de l'apprentissage perceptivo-moteur.

2.3.2 L'approche écologique de l'apprentissage

Telle qu'elle était pensée à l'origine, l'approche écologique de la perception et de l'action devait permettre de fournir un cadre expliquant comment un individu peut se déplacer efficacement dans un environnement comportant des objets fixes et/ou mobiles (Gibson, 1958). Par ailleurs, le constat d'un vide empirique dressé par quelques auteurs (Michaels & Beek, 1995; Temprado & Montagne, 2001) souligne bien que les questions relatives à la notion d'apprentissage ne constituaient pas un axe de recherche primordial pour ce courant théorique. Il aura fallu attendre plusieurs décennies et le début des années 2000 (Camachon, 2004; Jacobs, 2001) pour que l'approche écologique de la perception et de l'action arrive à un niveau de maturité permettant d'appréhender les mécanismes de l'apprentissage perceptivo-moteur.

Dans un premier temps, nous nous appuyerons sur les travaux de Jacobs (2001) pour définir les principaux mécanismes de l'apprentissage que sont l'éducation de l'intention, l'éducation de l'attention et la calibration, puis nous détaillerons brièvement comment s'opère l'apprentissage perceptivo-moteur.

Éducation de l'intention

L'Homme, l'animal ou n'importe quel autre agent, interagissent en permanence avec leur environnement. Dans une situation donnée, il est donc possible de percevoir et d'agir de différentes façons. Par exemple, lorsqu'un mobile se dirige vers un agent, ce dernier peut percevoir la vitesse ou la taille de l'objet, déterminer si cet objet est dangereux ou inoffensif et choisir de l'éviter, l'attraper ou le frapper. Face

à cette multitude de choix possibles, la première étape de l'apprentissage, appelée éducation de l'intention, consiste à choisir l'action la plus adaptée au regard de la situation rencontrée (Jacobs & Michaels, 2002; 2007). Autrement dit, le processus d'éducation de l'intention consiste à découvrir les principes élémentaires de la tâche à réaliser puis à mettre en œuvre les moyens perceptifs et/ou moteurs les plus appropriés pour réaliser une action adaptée à la situation présente.

L'intention joue donc un rôle prépondérant parce qu'elle va déterminer le type de variable informationnelle que l'agent va devoir utiliser pour guider son action. Concrètement, il est nécessaire d'avoir une intention donnée pour savoir quelles sont les variables informationnelles permettant de répondre à la tâche. Quelques exemples peuvent permettre de mieux comprendre ce processus. Considérons un pilote de chasse qui vole à basse altitude pour éviter d'être repéré par un radar ennemi. Dans ce cas, l'intention du pilote est de voler suffisamment bas pour ne pas être détecté tout en gardant une distance de sécurité minimale avec le sol pour éviter d'éventuels obstacles. Pour cela, le pilote pourra utiliser des variables informationnelles lui précisant la variation d'altitude telle que GOFR (cf., partie 2.2.3). Une fois la mission terminée, le pilote rentre à sa base avec l'intention de se poser. Dans ce cas, le pilote pourra utiliser la forme de la piste ou l'angle H pour contrôler la trajectoire de l'avion lors de la phase d'approche (cf., partie 2.2.1 et 2.2.2). L'intention de l'agent permet donc de définir le support informationnel utile au contrôle de l'action. Nous allons maintenant définir, à travers le concept d'éducation de l'attention, les moyens permettant à l'agent de détecter la variable informationnelle la plus adaptée au contrôle de l'action.

Éducation de l'attention

Afin d'appréhender les mécanismes qui sous-tendent l'éducation de l'attention, il est nécessaire de définir deux points particuliers. Tout d'abord, l'agent dispose d'un éventail de variables informationnelles différentes pour contrôler chacune de ses actions. Prenons l'exemple d'un joueur de base ball dont le but est de frapper la balle avec sa batte. Lorsque la balle approche, l'un des moyens permettant de déterminer à quel moment initier le mouvement consiste à percevoir le temps restant avant l'arrivée de celle-ci. Pour cela, le joueur peut se baser sur différentes informations. Par exemple, il peut s'appuyer sur l'expansion optique des contours de la balle qui lui permettra de savoir si celle-ci arrive plus ou moins vite ou bien utiliser *tau* qui donne directement accès au temps restant avant le contact avec la balle. Une même action (frapper la balle) peut donc impliquer la détection de variables informationnelles

différentes (expansion optique des contours de la balle ou *tau*).

D'autre part, ces variables informationnelles peuvent avoir un statut différent. Certaines vont permettre de spécifier directement l'état du système agent-environnement, on parle alors de variables informationnelles de haut rang, tandis que d'autres sont simplement corrélées à l'état de ce système sans forcément le spécifier, on parle alors de variables informationnelles de bas rang. Par exemple, *tau* est considéré comme une variable informationnelle de haut rang³ puisqu'il permet d'avoir directement accès à une propriété du système qui intéresse le batteur (i.e., le temps restant avant de déclencher la frappe). A l'inverse, la vitesse d'expansion optique des contours de la balle est une variable informationnelle de bas rang puisque sur cette seule base, le joueur ne dispose pas d'une information suffisante pour savoir combien de temps il reste avant de frapper la balle. Le contrôle de l'action peut donc se faire à partir de variables informationnelles de bas rang et/ou de haut rang (Michaels & de Vries, 1998; Michaels, Zeinstra, & Oudejans, 2001). Par ailleurs, certains auteurs suggèrent que le choix du support informationnel serait déterminé par les contraintes spatio-temporelles de la tâche (Michaels & de Vries, 1998; Tresilian, 1999). Concrètement, une tâche induisant de faibles contraintes spatio-temporelles pourrait être réalisée sur la base d'informations de bas rang tandis qu'une tâche exécutée avec des contraintes beaucoup plus importantes pourrait conduire l'agent à utiliser des informations de haut rang en mesure de donner accès précisément à l'état du système agent-environnement. Les variables informationnelles utilisées en début d'apprentissage dépendent donc de plusieurs facteurs.

Toutefois, il est possible d'améliorer et de faciliter l'apprentissage en orientant l'attention des participants vers les variables informationnelles qui sont les plus utiles au contrôle de l'action (i.e., les informations de haut rang). Cette transition, caractérisée par l'abandon de variables de bas rang pour des variables de haut rang, est appelée éducation de l'attention⁴ (Gibson, 1966; 1979). Un tel phénomène a été

3. Les termes variable informationnelle de haut rang et invariant sont des synonymes qui renvoient tous deux au fait que l'information permet d'avoir directement accès à une propriété du système agent-environnement

4. Nous souhaitons préciser que l'attention est un concept également défini et utilisé dans le cadre de l'approche cognitive (cf. Bertrand & Garnier, 2005: p.99). L'attention se distingue sous différentes formes qui peuvent être l'attention soutenue, sélective ou divisée. L'attention soutenue est la capacité à réagir à ce qui se passe dans l'environnement au cours d'une tâche longue et monotone. L'attention sélective est la forme la plus largement décrite. Elle permet de choisir l'information à utiliser. Cela présuppose (1) une capacité de traitement de l'information est limitée et (2) l'existence de filtres attentionnels permettant de trier cette information (effet de Stroop ou de la cocktail party). L'attention divisée est la capacité d'un individu à répondre à plusieurs tâches

mis en évidence à plusieurs reprises dans des tâches de freinage d'urgence (Fajen & Devaney, 2006), d'estimation de force (Michaels & de Vries, 1998) ou d'estimation de la masse relative de deux objets qui entrent en collision (Jacobs, Runeson, & Michaels, 2001 ; voir aussi Jacobs, Michaels, & Runeson, 2000). Jacobs et al. (2001) ont mené une série de trois expériences⁵ permettant de mettre en évidence le processus d'éducation de l'attention. La tâche consistait à évaluer la masse relative de deux balles qui rentraient en collision (Figure 2.11, page suivante). Pour estimer ce ratio, différentes variables informationnelles pouvaient être utilisées. Runeson (1995) a montré que la masse relative des balles après la collision pouvait être spécifiée par une information de haut rang. Cette dernière représente la quantité relative de changement de vitesse et s'exprime par la relation suivante :

$$\frac{m_A}{m_B} = \frac{|v_B - u_B|}{|v_A - u_A|} \quad (2.1)$$

où m_A et m_B sont les masses des deux balles, u_A et u_B les vitesses des balles avant l'impact et v_A et v_B les vitesses des balles après l'impact. D'autres variables corrélées à la masse relative (i.e., qui ne spécifient pas directement l'état du système) peuvent également être utilisées telles que la différence de vitesse des balles après l'impact (vitesse de sortie), la différence d'angle des balles après la collision (angle de sortie) ou encore une combinaison de ces deux variables informationnelles. Dans des conditions de pratique normales, l'ensemble de ces variables permet de juger précisément la masse relative des balles. Cependant un aménagement approprié de l'environnement peut rendre l'utilisation des variables de bas rang inefficace sans pour autant affecter la variable de haut rang. Par exemple, il est possible de "geler" l'angle de sortie des balles en manipulant les conditions de pratique pour que celui-ci soit toujours identique après la collision. Dès lors, cette variable sera peu pertinente pour juger la masse relative des balles. En revanche, malgré les manipulations des conditions de pratique, la variable de haut rang permettra toujours de juger correctement le ratio puisque celle-ci repose sur un différentiel de vitesse des balles avant et après la collision. L'objectif de Jacobs et al. (2001) était précisément d'aménager les conditions de pratique pour inciter les participants à se tourner vers l'utilisation de la variable de haut rang.

de façon simultanée (paradigme de la double tâche). Enfin, l'attention peut être un mécanisme automatique (i.e. en réponse à des signaux signifiants) ou contrôlé (i.e. capter des signaux qui vont arriver, Schneider & Shiffrin, 1977). Pour résumer, l'attention est un mécanisme qui permet de se focaliser sur un point particulier ou de répartir la concentration sur plusieurs activités. Elle a des ressources limitées et son potentiel varie en fonction des individus.

5. Seuls les résultats des expériences 2 et 3 sont présentés ici.

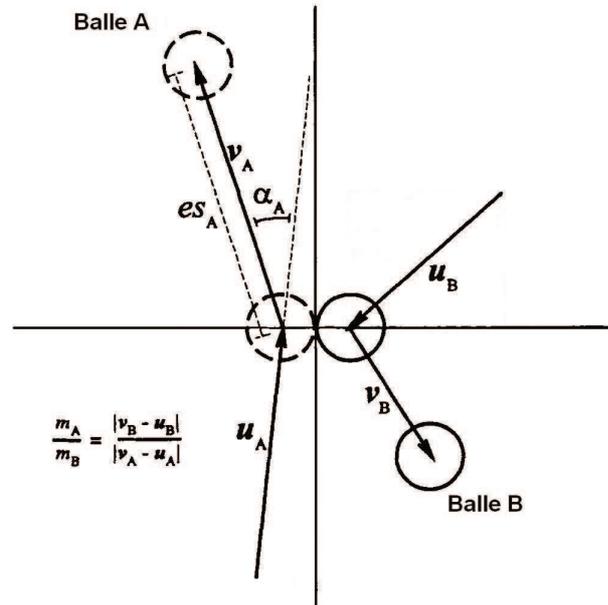


FIGURE 2.11 – Représentation schématique en deux dimensions de la collision entre les balles. Les balles arrivaient avec une vitesse initiale constante. Suite à la collision, les participants pouvaient estimer la masse relative des deux balles d’après la quantité relative de changement de vitesse (cf., equation 2.1) ou en utilisant des informations de bas rang telles que la vitesse (es) et/ou l’angle (α) de sortie des balles après l’impact (d’après Jacobs et al., 2001).

La procédure d’apprentissage se décomposait en trois étapes. Tout d’abord, le prétest mettait en jeu différentes séries de collisions et permettait, grâce à une méthode de corrélation, d’identifier le support informationnel utilisé par les participants en début d’apprentissage. Durant cette phase, les participants ne recevaient aucun feedback. La deuxième étape (phase d’acquisition) consistait en l’aménagement des conditions de pratique pour orienter l’attention des participants vers la variable informationnelle de haut rang. Nous détaillerons précisément dans le paragraphe suivant les différentes manipulations effectuées. Lors de la phase d’acquisition, les participants recevaient un feedback à la fin de chaque essai leur indiquant si leur jugement était précis, correct ou incorrect en fonction de marges déterminées à l’avance par l’expérimentateur. Enfin, la dernière étape (test de rétention) visait à identifier quelle(s) étai(en)t la(les) variable(s) informationnelle(s) utilisée(s) après la phase d’acquisition. En comparant les informations utilisées par les participants avant et après la phase d’acquisition, il était possible de déduire l’effet de l’aménagement

des conditions de pratique sur l'apprentissage. Les participants ne recevaient pas de feedback pendant le test de rétention.

Dans leur deuxième expérience, Jacobs et al. (2001) ont mis en place deux groupes expérimentaux. Chaque groupe expérimental a été soumis à un aménagement des conditions de pratique différent. Pour le premier groupe (groupe sans variation), les conditions de pratique étaient manipulées pour que l'utilisation des variables informationnelles disponibles après la collision (angle et vitesse de sortie) conduise les participants à toujours estimer la même masse relative de balles. Concrètement, les essais étaient choisis de manière à ce que la vitesse de sortie des balles après la collision soit toujours identique. De la même façon, l'information « angle de sortie des balles » était neutralisée en étant limitée à deux valeurs différentes (40° ou 100°). Ainsi, les participants qui utilisaient les variables de bas rang percevaient toujours la même masse relative et par conséquent, recevaient systématiquement un feedback négatif. La répétition du feedback négatif incitait alors les participants à explorer l'environnement perceptif à la recherche d'une variable plus efficace. Comme nous l'avons expliqué précédemment, les participants disposaient alors de la variable de haut rang qui n'était pas affectée par les manipulations des conditions de pratique et qui permettait de juger précisément la masse relative des balles. Les résultats ont montré qu'un tel aménagement des conditions de pratique induisait des effets bénéfiques temporaires. En effet, les participants venaient à utiliser la variable de haut rang pendant la phase d'acquisition mais retournaient à l'utilisation des variables informationnelles de bas rang lors du test de rétention, c'est à dire lorsqu'ils ne disposaient plus du feedback.

Pour le deuxième groupe (groupe corrélation nulle), Jacobs et al. (2001) ont aménagé les conditions de pratique de façon différente. En effet, les conditions de pratique étaient manipulées de manière à ce que les participants ne puissent jamais estimer correctement la masse relative des balles en utilisant les variables informationnelles de bas rang. Autrement dit, le ratio estimé à partir de l'utilisation des variables de bas rang était différent à chaque essai mais n'était pas corrélé à la masse relative réelle des balles. A l'instar du groupe précédent, les participants recevaient une grande majorité de feedback négatif les incitant à délaisser l'utilisation des variables informationnelles de bas rang au profit de la variable de haut rang qui était plus efficace. Les résultats ont montré que cette manipulation pouvait induire des effets bénéfiques à long terme lorsque les participants avaient détecté l'information de haut rang pendant la phase d'acquisition. A l'inverse, les participants qui n'avaient pas encore trouvé l'information de haut rang atteignaient un faible niveau d'apprentissage dans le test de rétention dans la mesure où ils étaient encore à la recherche

d'une variable informationnelle leur permettant de réaliser la tâche correctement. En s'appuyant sur ce constat, Jacobs et al. (2001) ont mis en place un protocole visant à éduquer l'attention des participants de façon durable vers l'information de haut rang tout en limitant les effets négatifs du groupe corrélation nulle.

Dans leur troisième expérience, Jacobs et al. (2001) ont donc mis en place deux groupes expérimentaux en s'inspirant des manipulations effectuées sur les conditions de pratique du groupe corrélation nulle. La différence principale consistait à rendre l'utilisation d'une seule variable de bas rang inefficace plutôt que les deux simultanément. Ainsi, pour le premier groupe, l'aménagement des conditions de pratique affectait uniquement la variable de bas rang vitesse de sortie (groupe corrélation de la vitesse nulle). Lorsque les participants utilisaient cette variable, ils émettaient systématiquement un jugement erroné. Pour le second groupe, le même procédé était appliqué à la variable de bas rang angle de sortie (groupe corrélation de l'angle nulle). Les résultats ont montré que pour être efficaces, les manipulations des conditions de pratique devaient affecter la variable informationnelle de bas rang utilisée par les participants en début de pratique. Il est possible d'illustrer clairement ces propos en prenant pour exemple un participant du groupe corrélation de la vitesse nulle (Figure 2.12.A, page suivante) et un participant du groupe corrélation de l'angle nulle (Figure 2.12.B, page suivante). Ces figures représentent la corrélation entre les différentes variables informationnelles utilisées par les participants et l'estimation des masses relatives des balles en fonction des différentes phases expérimentales. Plus la corrélation (R^2) est élevée, c'est-à-dire proche de 1, plus l'information considérée permet d'expliquer les jugements établis par les participants.

Les résultats obtenus lors du prétest (bloc 1) ont montré que le participant du groupe corrélation de la vitesse nulle (Figure 2.12.A, page suivante) utilisait l'information « vitesse de sortie des balles ». Pour ce participant, l'aménagement des conditions de pratique a permis de manipuler la corrélation entre la variable informationnelle « vitesse de sortie des balles » et la masse relative des balles lors de la phase d'acquisition (blocs 2, 3, 4). L'aménagement des conditions de pratique rendait donc l'utilisation de cette variable informationnelle inefficace, conduisant ainsi le participant à explorer l'environnement perceptif et à découvrir la variable informationnelle de haut rang (invariant). Cette méthode présentait un effet durable puisque le participant détectait la variable informationnelle de haut rang pendant la phase d'acquisition puis continuait de l'utiliser lors du test de rétention (bloc 5).

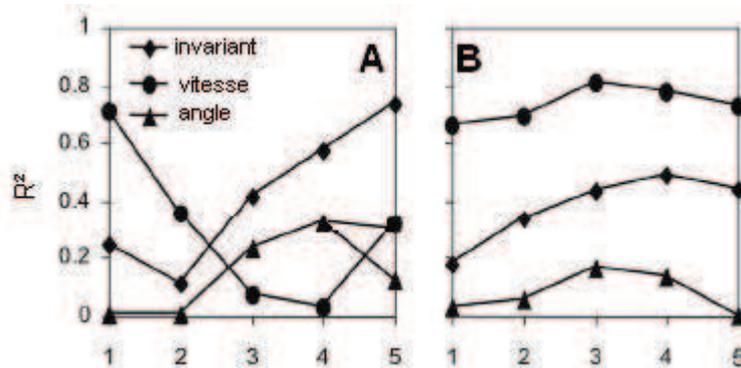


FIGURE 2.12 – Corrélations entre les masses relatives des balles et les différentes variables informationnelles utilisées pour deux participants différents de l’expérience 3 (Jacobs et al., 2001). L’axe des abscisses représente les différentes phases de l’expérience (1 : prétest ; 2, 3, 4 : phase d’acquisition et 5 : test de rétention). Sur l’axe des ordonnées, plus la corrélation (R^2) est élevée, c’est-à-dire proche de 1, plus l’information utilisée permet d’expliquer les jugements établis par les participants. Les participants A et B utilisent l’information vitesse de sortie lors du prétest (bloc 1). Pour le participant A (Figure 21.A), cette information est manipulée pendant la phase de pratique (blocs 2, 3, 4). Celui-ci abandonne donc l’information vitesse de sortie au profit d’une information de haut rang. De plus, on observe que les effets sont durables puisque ce participant utilise toujours l’information de haut rang lors du test de rétention (bloc 5). A l’inverse, cette information n’est pas manipulée pour le participant B (Figure 21.B), il continue donc de l’utiliser lors de la phase de pratique et du test de rétention (d’après Jacobs et al., 2001).

En début de pratique, le participant du second groupe utilisait aussi la variable « vitesse de sortie des balles » (Figure 2.12.B). Cependant, l’aménagement des conditions de pratique mis en place pour ce groupe expérimental visait à manipuler la variable « angle de sortie des balles ». De ce fait, l’utilisation de la vitesse de sortie des balles pouvait permettre de juger relativement correctement la masse relative des balles. La Figure 2.12.B montre que le participant utilisait précisément cette variable. Il estimait donc avec précision la masse relative des balles lors de la phase d’acquisition (blocs 2, 3 et 4) et recevait une grande majorité de feedback positif lui indiquant que la variable informationnelle utilisée était suffisamment pertinente. Par conséquent, ce participant continuait à utiliser l’information « vitesse de sortie » tout au long de la phase d’acquisition et lors du test de rétention (bloc 5).

Pour résumer, les résultats montrent que les participants qui utilisaient la variable informationnelle de bas rang manipulée lors de la phase d’acquisition conver-

geaient de façon durable vers la variable informationnelle de haut rang. A l'inverse, les participants qui utilisaient la variable informationnelle de bas rang qui n'était pas manipulée lors de la phase d'acquisition continuaient de l'utiliser jusqu'au test de rétention.

Pris dans leur ensemble, les résultats obtenus au cours de la série d'expériences menée par Jacobs et al. (2001) montrent qu'une méthode basée sur la neutralisation des variables informationnelles de bas rang (groupe sans corrélation) permet d'éduquer l'attention des participants de façon temporaire. A l'inverse, une méthode basée sur la manipulation de toutes les variables informationnelles de bas rang (groupe zéro corrélation) s'avère efficace pour éduquer l'attention des participants mais comporte aussi le risque que ceux-ci ne découvrent finalement aucune information pertinente pour juger la masse relative des balles. Dans ce cas, les participants n'améliorent pas leur performance. Enfin, pour éduquer l'attention des participants vers une variable informationnelle de haut rang, la méthode la plus efficace consiste donc à manipuler la variable informationnelle qui est utilisée par le participant au début de la pratique. En d'autres termes, la connaissance préalable du support informationnel permettra d'adapter les conditions de pratique en fonction de chaque participant pour éduquer leur attention vers l'information de haut rang. L'apprentissage semble donc être un processus qui doit se faire de façon individualisée en tenant compte des différentes variables informationnelles utilisées par les participants.

La calibration

Au cours de l'apprentissage, les participants détectent et utilisent différentes variables informationnelles jusqu'à trouver celle qui permettra de réaliser correctement la tâche demandée. Cet apprentissage peut être amélioré en éduquant l'attention des participants vers une information de haut rang. Toutefois, selon Jacobs et Michaels (2006), l'éducation de l'attention n'explique pas à elle seule l'amélioration de l'apprentissage. Dans leurs travaux, les participants devaient simplement juger la distance à laquelle passait une balle ou bien tenter de l'attraper. Après avoir analysé les variables informationnelles utilisées par les participants, les auteurs ont montré que les participants continuaient de progresser et d'améliorer leur performance alors qu'ils utilisaient déjà une information de haut rang. Dès lors, l'augmentation du niveau de performance ne pouvait être imputé exclusivement au processus d'éducation de l'attention. Jacobs et Michaels (2006) ont mis en évidence l'existence d'un processus de calibration. Pour bien distinguer les deux processus, les auteurs proposent l'équation suivante (2.2) que nous avons volontairement simplifiée :

$$ES = C(i_{BR} \text{ ou } i_{HR}) \quad (2.2)$$

La partie gauche de l'équation (ES) correspond à l'état du système agent-environnement. L'agent peut accéder à l'état courant de sa relation avec l'environnement au moyen d'une variable informationnelle i spécifiant directement l'état du système (variable informationnelle de haut rang, i_{HR}) ou bien simplement corrélée à l'état de ce système (variable informationnelle de bas rang, i_{BR}). L'éducation de l'attention correspond au changement des variables informationnelles utilisées au cours de la pratique. Le paramètre C correspond à la calibration du processus permettant d'utiliser une même variable informationnelle de plus en plus efficacement. Autrement dit, la calibration désigne le processus permettant d'améliorer la détection de l'information et d'ajuster l'utilisation de cette information pour la mettre en relation avec la tâche désirée.

Les trois mécanismes détaillés précédemment (éducation de l'intention, éducation de l'attention et calibration) permettent de comprendre comment s'organise l'apprentissage perceptif. Concrètement, apprendre consiste tout d'abord à choisir l'action la plus adaptée aux exigences de la tâche puis à trouver la variable informationnelle la plus utile pour réaliser cette action donnée. Enfin, la dernière étape sera de calibrer le système perceptif pour utiliser cette information de la manière la plus efficace possible. Cependant, les travaux de Jacobs (2001) ne précisent pas comment le cycle information-mouvement se met en place au cours de l'apprentissage. Cette question est abordée dans le paragraphe suivant.

Comment s'opère l'apprentissage perceptivo-moteur ?

L'un des enjeux de l'apprentissage perceptivo-moteur est de comprendre comment le couplage entre l'information et le mouvement se construit et s'optimise au cours de la pratique. De ce fait, il est nécessaire de pouvoir caractériser les étapes qui jalonnent le passage de l'état de débutant à celui d'expert. Bien que la littérature nous permette d'avoir une idée précise du fonctionnement de ce couplage chez l'expert dans des tâches telles que le salto en gymnastique (Bardy & Laurent, 1998), le coup droit en tennis de table (Bootsma & van Wieringen, 1990) ou le saut en longueur (Lee, Lishman, & Thomson, 1982; Glize & Laurent, 1997), très peu d'études ont cherché à comparer le comportement du débutant et de l'expert (Berg, Wade, & Greer, 1994). Les travaux de thèse de Camachon (2004) sont donc intéressants dans la mesure où le protocole expérimental mis en place permettait de faire un suivi longitudinal des participants. A travers une série d'expériences (Camachon, Buekers, & Montagne, 2004a; Camachon, Montagne, Buekers, & Laurent, 2004b; Montagne,

Buekers, Camachon, de Rugy, & Laurent, 2003), les auteurs se sont intéressés aux transformations perceptivo-motrices qui accompagnent l'acquisition d'une nouvelle habileté chez un même participant. A partir de ces différentes études, Camachon (2004) a proposé une conception de l'apprentissage perceptivo-moteur construite en trois temps.

Afin de pouvoir réaliser une nouvelle tâche, l'agent doit tout d'abord intégrer les conséquences motrices de ses actions. En d'autres termes, il doit découvrir les possibilités d'actions qui s'offrent à lui. Par exemple, pour se déplacer dans un environnement virtuel à l'aide d'un joystick, cela nécessitera dans un premier temps qu'il teste et s'habitue aux conséquences sensorielles résultantes d'une action sur celui-ci. Cette calibration⁶ est uniquement destinée à créer les conditions pour que le cycle information-mouvement soit mis en place. Une fois que le système est calibré, l'agent va mettre en relation une variable informationnelle du flux perceptif avec un paramètre du mouvement. Le but sera d'opérationnaliser le cycle information-mouvement en découvrant une variable permettant de répondre aux contraintes de la tâche. Enfin, la dernière étape consiste à optimiser le cycle information-mouvement pour atteindre un haut niveau d'expertise. Ces travaux nous permettent donc de proposer une définition générale de l'apprentissage perceptivo-moteur à même de résumer les différents aspects détaillés au sein de cette section.

2.3.3 Conclusions

Schmidt (1993) a déjà proposé de décrire l'apprentissage perceptivo-moteur comme « un ensemble d'opérations associées à la pratique ou à l'expérience, qui conduisent à des changements relativement permanents de la capacité à répondre à une situation ». Bien entendu « l'ensemble d'opérations » renvoie à des mécanismes qui diffèrent en fonction de la conception théorique adoptée. Dans notre cas, et à partir du constat reposant principalement sur les travaux de Jacobs (2001), nous pouvons définir l'apprentissage au sein de l'approche écologique comme le processus qui consiste à découvrir et à optimiser des relations particulières entre des variables informationnelles présentes dans le flux perceptif et des variables cinétiques (i.e., des paramètres du mouvement) puis à affiner ce dialogue perceptivo-moteur en explorant l'ensemble

6. Nous souhaitons préciser que l'utilisation du terme calibration est compatible avec la définition donnée par Jacobs (2001). En effet, la calibration désigne le processus qui permet d'utiliser une information de plus en plus efficacement. Dans le cas présent, la calibration correspond à un étalonnage moteur permettant de mettre en relation une information et le mouvement produit. Le même terme est utilisé par Jacobs (2001) pour désigner les liens qui unissent une information et la propriété qu'elle spécifie.

des relations (et donc des solutions) possibles entre l'information et le mouvement.

Cependant de nombreuses questions restent encore sans réponse. L'aide à l'apprentissage, c'est-à-dire les méthodes qui ont pour objectif de guider le sujet dans sa découverte de l'information utile, est un thème relativement inexploré dans le cadre écologique de l'apprentissage perceptivo-moteur.

2.4 Comment faciliter l'apprentissage d'une tâche perceptivo-motrice ?

L'un des objectifs sous-jacents de ce travail de thèse est d'améliorer la détection des variables informationnelles pertinentes lors de la phase d'approche de l'atterrissage. Le support informationnel utilisé par les pilotes pour contrôler leur trajectoire étant largement identifié dans la littérature (cf., partie 2.2) nous pensons qu'une première étape consisterait à faciliter la détection et l'utilisation de ces différentes variables informationnelles. Nous présenterons donc ici différentes méthodes d'aide à l'apprentissage basées sur l'utilisation d'informations artificielles ajoutées pendant la phase d'acquisition ou sur l'aménagement des conditions de pratique. Les travaux présentés dans les paragraphes suivants sont principalement issus des approches traditionnelles, c'est pourquoi nous proposons à la fin de chaque partie une réflexion relative à l'utilisation d'un même outil dans un cadre théorique différent.

2.4.1 Apprentissage et feedback

Définition et principaux types de feedback

Le terme feedback renvoie à l'ensemble des informations que le sujet peut recevoir sur sa prestation suite à la mise en œuvre d'une action. Par exemple, le joueur de basket ball sait que son tir est raté en voyant que le ballon ne passe pas dans le panier et un escrimeur peut savoir qu'il vient d'être touché en sentant l'épée de son adversaire sur les différentes parties de son corps. Les informations provenant des différents systèmes perceptifs (vision, audition, proprioception) nous permettent d'évaluer nos mouvements et nos actions. Parfois, l'agent peut même savoir que son mouvement n'est pas correct avant que celui-ci ne soit totalement fini. Par exemple, certains lanceurs de javelot « mordent » volontairement la zone d'élan afin d'annuler leur essai avant même de savoir quelle distance a été réalisée parce que les différents retours proprioceptifs leurs ont permis de savoir que le mouvement produit pour lancer le javelot n'était pas optimal. Ces informations issues de la pratique et qui

font références aux retours sensoriels arrivant à l'agent sont communément appelées feedback intrinsèques (Schmidt, 1993).

Il est aussi possible d'informer un athlète sur son temps de course ou sa distance de saut, un joueur de tennis sur la vitesse de son service ou encore un joueur de golf sur la direction et la force du vent qu'il y a sur le parcours avant qu'il ne frappe la balle. Dans ce cas, l'information est apportée par une tierce personne (entraîneur, enseignant, public, machine) et on parle de feedback extrinsèque. Magill (2004) définit le feedback extrinsèque comme « une information complémentaire, fournie généralement de manière artificielle, visant à augmenter ou renforcer le feedback intrinsèque quand notre système sensoriel est capable d'avoir accès à l'information par ses propres moyens, ou bien comme une information supplémentaire lorsque notre système sensoriel n'est pas à même de détecter cette information tout seul ». De par sa nature artificielle, le feedback extrinsèque⁷ présente l'avantage d'être complètement modulable en termes de fréquence, mode ou style de présentation. Il constitue donc un moyen efficace pour structurer et améliorer l'apprentissage.

Le feedback extrinsèque peut se différencier en fonction de la nature des informations qu'il fournit à l'agent. Les plus couramment présentés dans la littérature sont la connaissance du résultat (CR) et la connaissance de la performance (CP). La connaissance du résultat correspond à une information quantitative (i.e., réussite ou échec, distance de lancer, vitesse du service, longueur de foulées) ou qualitative (i.e., « c'est bon », « tu peux mieux faire ») sur le résultat de l'action alors que la connaissance de la performance constitue une information sur la façon de produire une action (i.e., « change la prise de la raquette », « flexion, plantez le bâton, extension », « abaisse ton centre de gravité »). Dans le cadre de cette thèse, l'une de nos préoccupations est de savoir quand, comment et à quelle fréquence donner le feedback extrinsèque à l'agent afin d'améliorer l'apprentissage de façon significative.

7. Dans les situations réelles, les sujets reçoivent généralement suffisamment de feedback intrinsèque pour être informés des résultats de leurs actions. Vereijken et Whiting (1990) ont par exemple montré que dans une tâche d'apprentissage sur simulateur de ski, les sujets ne tiraient aucun bénéfice particulier de feedback extrinsèques sur divers aspects de leur performance. Il est certain que dans la mesure où la tâche fournit en elle-même suffisamment d'informations quant à la congruence du résultat obtenu avec le résultat désiré, un feedback extrinsèque peut être superflu. En revanche, le feedback extrinsèque s'avère d'une grande utilité dans des tâches de laboratoire pour remplacer un feedback intrinsèque auquel le participant n'a pas accès. Par exemple, lors de tâches de franchissement d'obstacles (Camachon et al., 2004b) ou d'interception de balle (Morice, François, Jacobs, & Montagne, 2010) réalisées en réalité virtuelle, le feedback extrinsèque permet de remplacer le contact physique entre l'agent et les objets et ainsi d'informer le participant de la réussite ou de l'échec de son action (e.g., a-t-il franchi l'obstacle correctement ? A-t-il intercepté le mobile avec la tête?).

Cette question est abordée dans le paragraphe suivant.

Comment administrer le feedback ?

De nombreuses recherches ont été conduites afin de déterminer les différents paramètres pouvant influencer l'efficacité d'un feedback extrinsèque lors de l'apprentissage d'habiletés nouvelles (cf., Schmidt & Lee, 2005 pour une revue). De multiples facteurs peuvent jouer un rôle sur l'efficacité du feedback extrinsèque, tels que le niveau de précision de celui-ci (Trowbridge & Cason, 1932) ou le temps écoulé entre la réalisation de l'essai et la présentation du feedback (Swinnen, Nicholson, Schmidt, & Shapiro, 1990). Dans un souci de clarté, nous nous focaliserons sur les études relatives à la fréquence de présentation du feedback extrinsèque, aux différentes procédures de distribution (i.e., imposé ou à la demande) ainsi qu'au moment (i.e., pendant ou après l'essai) de présentation du feedback extrinsèque.

Il est clairement établi que le feedback extrinsèque, lorsqu'il est fourni de manière systématique, permet d'améliorer la performance durant l'acquisition d'une nouvelle tâche sans pour autant améliorer l'apprentissage (Salmoni et al., 1984). En effet, le feedback extrinsèque peut engendrer une dépendance en se substituant aux différents feedback intrinsèques expliquant ainsi son rôle limité dans le processus d'apprentissage. Salmoni et al. (1984) ont appelé ce phénomène « effet de guidage ». Pour dépasser ces limites, les chercheurs se sont donc attachés à contrôler le feedback extrinsèque de manière à réduire les risques associés au guidage de l'action. Ainsi, plusieurs études ont montrés qu'une diminution de la fréquence de présentation du feedback pouvait avoir des effets bénéfiques sur l'apprentissage (Lee, White, & Carnahan, 1990; Park, Shea, & Wright, 2000; Winstein & Schmidt, 1990). Par exemple, Winstein et Schmidt (1990) ont montré qu'un groupe de participants soumis à un feedback extrinsèque dont la fréquence était réduite de moitié apprenait mieux la tâche (Figure 2.13, page suivante).

Cette diminution de la fréquence de présentation du feedback extrinsèque peut se faire de différentes façons. Par exemple, il est possible d'attendre plusieurs essais avant de donner au participant l'ensemble des feedback pour tous les essais venant d'être réalisés (i.e., le participant fait quatre essais sans avoir accès au feedback puis reçoit l'ensemble des feedback à la fin du cinquième essai). Dans une tâche de lancer de balle, Lavery (1962; voir aussi Schmidt, Lange, & Young, 1990; Schmidt, Young, Swinnen, & Shapiro, 1989) a comparé un groupe de participants disposant du feedback extrinsèque après chaque essai avec un groupe de participants qui recevaient l'ensemble des feedback après vingt essais (feedback résumé). Un dernier

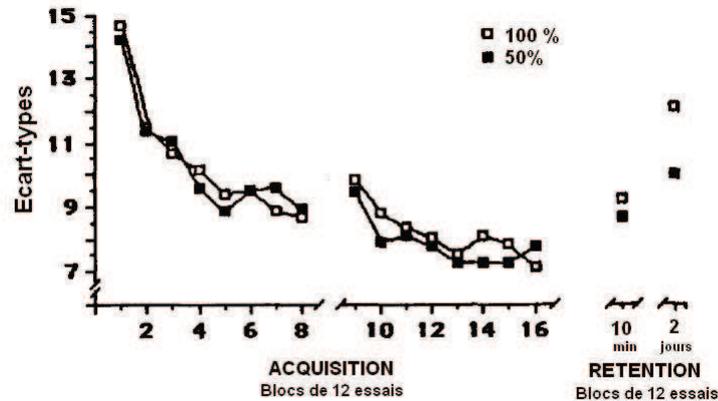


FIGURE 2.13 – L'utilisation massive du feedback extrinsèque peut entraîner une forte dépendance (carrés blancs). La diminution de la fréquence de présentation du feedback permet un meilleur apprentissage (carrés noirs), (d'après Winstein & Schmidt, 1990).

groupe recevait les deux types de feedback. Les résultats montrent que les participants qui recevaient uniquement le feedback résumé étaient moins performants pendant la phase d'acquisition mais atteignaient un meilleur niveau d'apprentissage lors des tests de rétention. D'autres méthodes permettent de réduire la fréquence de présentation du feedback et consistent à sevrer le participant au cours de la phase d'acquisition en diminuant progressivement le nombre de présentations du feedback (Camachon, Jacobs, Huet, Buekers, & Montagne, 2007; Schmidt, 1993) ou à faire apparaître le feedback lorsque l'erreur produite par le participant atteint un seuil déterminé à l'avance (Lintern, 1980; Lintern & Koonce, 1992).

Plus récemment, certains auteurs (Chiviawsky & Wulf, 2002; Janelle, Barba, Frehlich, Tennant, & Cauraugh, 1997; Janelle, Kim, & Singer, 1995; Wulf & Toole, 1999) ont étudié la possibilité de laisser le participant réguler la fréquence de présentation lui-même. Ainsi, le participant n'est plus obligé de suivre une fréquence de présentation imposée par l'expérimentateur et peut demander le feedback extrinsèque uniquement lorsqu'il pense en avoir besoin. Dans une tâche de lancer de balle, Janelle et al. (1997) ont comparé quatre groupes. Le premier groupe effectuait la tâche sans feedback extrinsèque (contrôle), le second groupe disposait d'un feedback résumé (i.e., recevant l'ensemble des feedback après cinq essais), le troisième groupe disposait du feedback à la demande et enfin le quatrième groupe recevait un feedback qui était fonction des demandes des participants du troisième groupe. En effet, pour ce dernier groupe, chaque participant recevait le feedback à la même fréquence

et au même moment qu'un des participants du groupe à la demande qui lui était associé. La seule différence entre les groupes résidait dans le fait que les participants du groupe à la demande choisissaient quand avoir le feedback et les participants du groupe associé avaient un feedback imposé. Les résultats montrent que le groupe qui atteignait le meilleur niveau d'apprentissage était celui qui disposait du feedback à la demande (Figure 2.14). De plus, les participants de ce groupe réduisaient graduellement le nombre de demande du feedback extrinsèque au cours de l'expérience. Cette stratégie leur permettait d'une part, d'avoir beaucoup d'informations au début de la pratique pour paramétrer leurs mouvements et d'autre part, de se préserver de tout effet de guidage du feedback en s'en affranchissant au cours de la phase d'acquisition.

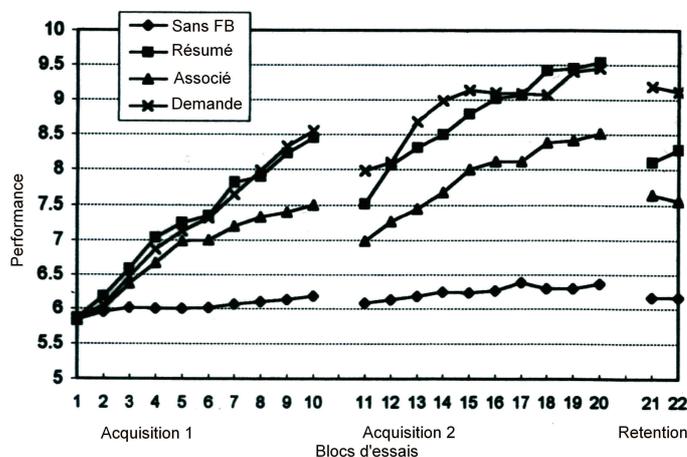


FIGURE 2.14 – Effets de différents types de feedback sur l'apprentissage d'une tâche de lancer. Le groupe qui atteint le meilleur niveau d'apprentissage est celui qui dispose du feedback à la demande (croix) devant les participants qui ont un feedback résumé (carré), associé (triangle) ou pas de feedback du tout (losange), (d'après Janelle et al., 1997).

Enfin, le dernier point que nous souhaitons aborder concerne le moment auquel donner le feedback extrinsèque. La grande majorité des études présentées ci-dessus fait état d'un feedback extrinsèque terminal, c'est-à-dire présenté après la réalisation de l'essai. Si ce type de feedback paraît particulièrement bien adapté aux mouvements courts ou balistiques tels que le tir ou le pointage manuel de cible, une autre alternative consiste à fournir le feedback pendant la réalisation de l'essai lorsque le participant doit effectuer des mouvements de longue durée ou apprendre des habilités

motrices complexes. Ce type de feedback est appelé feedback simultané⁸. Plusieurs études ont déjà révélé que ce type de feedback pouvait être à l'origine d'un effet de guidage relativement puissant (Park et al., 2000 ; Schmidt & Wulf, 1997; Vander Linden, Cauraugh, & Greene, 1993). Par exemple, Park et al. (2000) ont montré dans une tâche de reproduction de patrons de force que le groupe qui avait le mieux appris était celui qui disposait d'un feedback simultané dont la fréquence de présentation était réduite. Toutefois, la portée de ces résultats reste limitée par le fait que les participants qui recevaient le feedback simultané avec une fréquence réduite n'étaient pas meilleurs que le groupe contrôle. L'ensemble des travaux présentés dans cette partie nous amène à penser que le feedback simultané pourrait être un outil pertinent pour faciliter l'apprentissage de la phase d'approche. Nous souhaitons donc mettre en perspective les effets d'un tel outil dans le cadre de l'approche écologique de la perception et de l'action.

Vers une conception écologique du feedback simultané

Les travaux présentés précédemment s'inscrivent résolument dans le cadre des approches traditionnelles. Dès lors, l'information véhiculée par le feedback extrinsèque se conçoit comme étant totalement artificielle puisqu'en temps normal, celle-ci n'est pas directement accessible à l'agent dans l'environnement. Malgré de nombreuses tentatives pour déterminer la fréquence de présentation optimale, il semble difficile d'éviter un certain degré de dépendance se traduisant par un effet limité sur le processus d'apprentissage.

Par ailleurs, nous avons expliqué dans le cadre de l'approche écologique de la perception et de l'action (cf., partie 2.1.2) que l'agent prélève dans les différents flux perceptifs qui lui parviennent une information riche, porteuse de sens et directement disponible dans l'environnement. Cette définition du concept d'information permet d'envisager une utilisation du feedback extrinsèque et plus particulièrement du feedback simultané tout à fait différente. Le feedback simultané est donné pendant la réalisation de l'essai et offre au participant la possibilité d'établir un lien fort entre l'information véhiculée par le feedback et l'état courant du système agent-environnement. Cette redondance devrait donc permettre à l'agent d'orienter son attention vers les propriétés pertinentes du flux et ainsi d'accéder plus facilement à l'information utile au contrôle de l'action. Autrement dit, le feedback simultané a pour vocation de mettre en évidence certaines informations du flux perceptif sans s'y substituer. Dans cette optique, le feedback simultané devrait constituer un outil permettant d'éduquer l'attention de l'agent pour améliorer la performance mais

8. Le mot simultané correspond à la traduction du terme anglais *concurrent*.

aussi l'apprentissage sans forcément créer de dépendance.

A notre connaissance, les études visant à tester cette hypothèse dans le cadre de l'apprentissage perceptivo-moteur sont relativement rares et n'obtiennent pas les résultats escomptés (Camachon et al., 2007). Dans une tâche consistant à marcher dans un couloir virtuel en franchissant des portes oscillantes lorsque l'ouverture le permettait, les auteurs ont manipulé la fréquence de présentation d'un feedback simultané. Celui-ci représentait, à un instant donné, l'erreur qui serait commise au moment du franchissement si le participant maintenait sa vitesse de déplacement inchangée à partir de ce moment. Le participant pouvait donc être informé en temps réel sur sa situation vis-à-vis du franchissement à venir. Les participants pour lesquels la fréquence de présentation du feedback simultané était diminuée graduellement au cours de l'expérience atteignaient un niveau d'apprentissage identique à celui du groupe contrôle (i.e., réalisant la tâche sans feedback simultané) et un meilleur niveau que le groupe qui était soumis au feedback de façon systématique. Cela nous amène à penser que les participants n'ont pas réussi à mettre en relation l'information qui leur était fournie avec la tâche qu'ils exécutaient.

La procédure de feedback à la demande semble donc particulièrement adaptée pour répondre à cette limite. En effet, nous avons souligné précédemment (cf., partie 2.3.2) que l'éducation de l'attention vers les informations pertinentes du flux perceptif est un processus qui doit se faire, autant que possible, de façon personnalisée. Ainsi, le feedback à la demande présente le double avantage de pouvoir être utilisé par l'agent lorsqu'il pense en avoir besoin et de ne pas le perturber lorsque l'agent explore par lui-même les différentes sources informationnelles. Notre premier objectif consistera à tester l'influence d'un feedback simultané à la demande sur l'apprentissage d'une tâche de déplacement locomoteur (chapitre 3) puis dans le cadre de l'apprentissage de la phase d'approche (chapitre 4).

2.4.2 Apprentissage et aménagement de la pratique

La deuxième méthode que nous avons choisi d'utiliser pour faciliter l'apprentissage consiste en l'aménagement des conditions de pratique. A l'instar du rôle du feedback, cette question a été largement abordée par les théories traditionnelles. Nous présenterons ici les trois méthodes les plus fréquemment rencontrées dans la littérature, c'est-à-dire la variabilité de la pratique, l'interférence contextuelle et la spécificité de la pratique.

La variabilité de la pratique

La variabilité de la pratique correspond à la variation intentionnelle des modalités d'une tâche pendant sa réalisation (Schmidt & Bjork, 1992). La plupart du temps, ce procédé consiste à comparer un groupe de participants effectuant une tâche dont les modalités restent constantes (e.g., lancer une balle à une distance fixe) avec un groupe effectuant la tâche en incluant plusieurs niveaux de la même modalité (e.g., lancer une balle à différentes distances). Cette diversification des conditions d'apprentissage ou hypothèse de la variabilité de la pratique (cf. van Rossum, 1990, pour une revue) permet à l'agent d'établir des relations systématiques entre les conditions initiales de la tâche, les paramètres du mouvement et le résultat obtenu. Autrement dit, ces manipulations permettent à l'agent d'échantillonner un ensemble de conditions différentes dans le but d'optimiser la paramétrisation des PMG. Cette hypothèse est souvent évaluée à travers un test de rétention et/ou de transfert après la phase d'acquisition.

L'expérience conduite par Catalano et Kleiner (1984) illustre clairement les avantages d'une pratique variable. Dans une tâche d'anticipation-coïncidence, les participants devaient appuyer sur un bouton lorsqu'un mobile simulé par un patron lumineux arrivait à un point particulier. Pour le groupe variable, le mobile pouvait arriver à quatre vitesses différentes tandis que le groupe constant (constitué de quatre sous groupes) effectuait la tâche à une seule des quatre vitesses possibles. L'apprentissage était ensuite évalué à travers un test de rétention dans lequel le mobile pouvait arriver à quatre nouvelles vitesses (Figure 2.12).

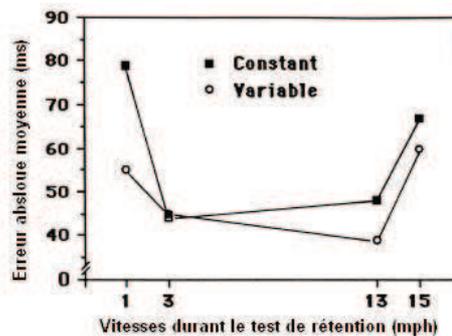


FIGURE 2.15 – Erreur absolue moyenne (ms) lors d'un test de rétention avec des vitesses nouvelles pour un groupe ayant eu une pratique variable (ronds blancs) ou constante (carrés noirs). Le groupe variable atteint un meilleur niveau d'apprentissage (d'après Catalano & Kleiner, 1984).

Les résultats montrent que la performance du groupe variable était moins bonne que le groupe constant lors de la phase d'acquisition. Cependant les résultats obtenus lors du test de rétention montrent que le groupe variable était meilleur que le groupe constant quelle que soit la vitesse. De nombreuses expériences révèlent des résultats similaires (Buekers, 1995; Pigott & Shapiro, 1984) et suggèrent l'efficacité d'une pratique variable⁹ dans le cadre de l'apprentissage perceptivo-moteur.

L'interférence contextuelle

D'autres travaux se sont intéressés à la façon d'organiser la pratique lorsque l'agent est confronté à plusieurs tâches différentes. La question est de savoir s'il est préférable d'opérer par blocs regroupant les mêmes tâches (i.e., faire tous les essais de la tâche A, puis tous les essais de la tâche B) ou au contraire, opérer suivant un mode aléatoire (i.e., en évitant deux essais consécutifs de la même tâche). Les premiers travaux à ce sujet ont été réalisés par Battig (1972) dans le domaine de l'apprentissage verbal. Dans cette expérience, un groupe de participants apprenait des listes organisées en blocs et un second groupe apprenait des listes organisées de façon aléatoire. Les résultats montrent que la performance du groupe aléatoire était moins bonne que celle du groupe qui apprenait en bloc pendant la phase d'acquisition. En revanche, leur performance était meilleure dans le test de rétention. Ce processus est appelé interférence contextuelle (voir Magill & Hall, 1990 pour une revue).

Shea et Morgan (1979) ont été les premiers à utiliser ce paradigme dans le cadre de l'apprentissage perceptivo-moteur. Dans ces expériences, les participants devaient produire, le plus rapidement possible, des patrons de mouvement de bras en renversant plusieurs cibles consécutives dans un ordre particulier. Trois parcours (A, B, C) étaient possibles et se différençaient par l'ordre des barrières à renverser. Les participants du groupe bloqué (faible interférence contextuelle) réalisaient d'abord tous les essais du parcours A, puis tous les essais du parcours B et enfin tous ceux du parcours C. Les participants du groupe aléatoire (haute interférence contextuelle) effectuaient les parcours dans un ordre aléatoire sans faire le même parcours deux fois de suite. Les résultats obtenus ont confirmé les prédictions de Battig concernant la différence de performance entre le groupe aléatoire et le groupe bloqué. La performance du groupe aléatoire était moins bonne que celle du groupe bloqué pendant la

9. Bien que certains résultats contradictoires aient été observés (cf. van Rossum, 1990, pour une revue) ceux-ci sont principalement attribués à la diversité (1) des méthodologies expérimentales mises en place et (2) des cohortes de participants étudiées (e.g., âge, genre ou encore niveau de pratique).

phase d'acquisition. À l'inverse, les auteurs ont montré que le groupe qui obtenait les meilleurs résultats lors du test de rétention était celui qui avait été soumis à une pratique aléatoire lors de la phase d'acquisition (Figure 2.16).

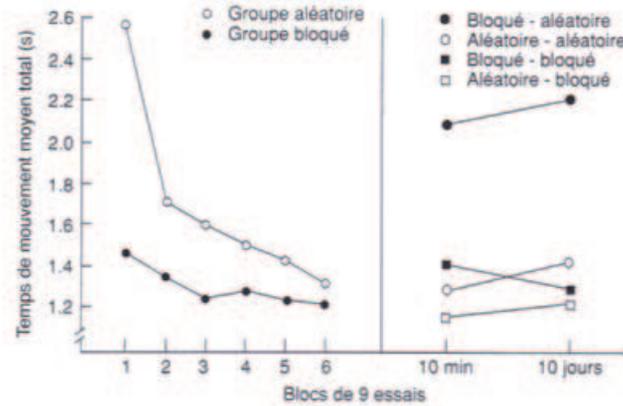


FIGURE 2.16 – Effets d'une pratique bloquée ou aléatoire sur une tâche de reproduction de patrons de mouvements lors de la phase d'acquisition et de test de rétention ayant lieu 10 minutes et 10 jours après la pratique. Le groupe aléatoire est moins performant pendant la phase d'acquisition mais atteint un meilleur niveau d'apprentissage dans les tests de rétention décalés dans le temps (d'après Shea & Morgan, 1979).

Ces résultats ont été répliqués de nombreuses fois dans des tâches de laboratoire (Lee & Magill, 1983; Wulf & Lee, 1993) ou dans des situations plus naturelles telles que le service au badminton (Goode & Magill, 1986), au volley ball (Fialho, Benda, & Ugrinowitsch, 2006) ou lors de frappe de balle en base ball (Hall, Domingues, & Cavazos, 1994). Sans livrer ici une présentation exhaustive des différentes hypothèses permettant d'expliquer les résultats liés au phénomène d'interférence contextuelle (cf., Shea & Zimny, 1983; Lee & Magill, 1983), l'une des interprétations théoriques possible réside dans le fait que les participants qui sont confrontés à une pratique aléatoire sont obligés de reconstruire leur réponse motrice à chaque essai. À l'inverse, les participants du groupe bloqué réalisent une meilleure performance lors de la phase d'acquisition parce qu'ils peuvent garder en mémoire d'un essai sur l'autre les réglages et les paramètres du programme moteur venant d'être généré. Cependant, dans la mesure où les tests de rétention demandent généralement de produire une nouvelle réponse, les participants qui ont appris selon un mode aléatoire se révèlent être plus performants car ils ont été régulièrement confrontés à la nécessité de faire varier les paramètres de programmation du mouvement.

La spécificité de la pratique

Plusieurs études suggèrent que l'acquisition d'une nouvelle habilité est directement dépendante des conditions d'apprentissage. Ce phénomène est appelé la spécificité de la pratique. Lorsque le temps de mouvement est suffisamment long, l'agent peut utiliser les différents retours sensoriels qui lui parviennent (i.e., les feedback intrinsèques) pour contrôler son mouvement. Par exemple, dans une tâche de pointage manuel, l'agent peut utiliser les retours proprioceptifs et/ou visuels pour guider son mouvement vers la cible. Le phénomène de spécificité de la pratique décrit le fait que l'apprentissage d'une telle tâche est spécifique aux retours sensoriels utilisés pendant la phase d'acquisition (Proteau, 1992; Tremblay & Proteau, 1998). En d'autres termes, si l'agent apprend à faire la tâche sur la base d'un retour visuel, la performance peut se dégrader lorsqu'il effectuera la même tâche en l'absence de la vision.

Ces effets ont été démontrés par Proteau, Marteniuk, Girouard et Dugas (1987) dans une tâche de pointage réalisée durant une phase d'acquisition courte (200 essais) ou longue (2000 essais) et dans des conditions de vision complète (main et cible) ou de vision restreinte (cible uniquement). Après la phase d'acquisition, les participants réalisaient un test de rétention dans les conditions de vision restreinte. Les résultats montrent alors que la performance du groupe vision complète diminuait significativement. De plus, cette diminution était d'autant plus grande que le nombre d'essais réalisé au cours de la phase d'acquisition était important. La suppression d'une information sensorielle disponible pendant la pratique diminue donc la performance de l'agent dans la tâche de pointage. Ces résultats révèlent que la représentation sensorielle du mouvement est spécifique aux conditions de pratique. En raison d'une représentation sensorielle du mouvement spécifique aux conditions d'apprentissage, la performance d'un agent dans un test de transfert semble être déterminée par la similitude des retours sensoriels disponibles dans les conditions d'acquisition et de transfert. Autrement dit, lorsque les retours sensoriels parvenant à l'agent lors d'un test de transfert sont différents de ceux disponibles lors de la pratique, l'hypothèse de spécificité de la pratique prédit qu'il y aura une diminution de la performance. Enfin, Proteau, Marteniuk et Levesque (1992) ont montré que cette hypothèse était aussi valide lorsque l'on rajoutait pendant le test de transfert, une source d'information sensorielle qui n'était pas présente pendant la phase de pratique. En effet, les résultats montrent qu'en ajoutant la vision lors du test de transfert, la performance se dégrade significativement pour le groupe qui a réalisé la tâche sans la vision lors de la phase d'acquisition.

Une nouvelle utilisation de l'aménagement de la pratique

Pris dans leur ensemble, ces travaux montrent qu'en aménageant les conditions de pratique de manière adéquate, il est possible de faciliter l'apprentissage d'une habileté motrice nouvelle. Ces effets bénéfiques sont souvent liés à la succession de conditions de pratiques différentes d'un essai sur l'autre, obligeant alors l'agent à réinitialiser les paramètres du mouvement ou à utiliser un PMG différent. Ces changements perpétuels ont pour conséquence de diminuer la performance lors de la phase d'acquisition mais s'avèrent être positifs lorsque l'agent est confronté à une tâche nouvelle.

Dans le cadre de cette thèse, nous avons voulu utiliser ces différents « outils d'apprentissage » pour éduquer l'attention d'un agent vers les informations utiles au contrôle de l'action. Autrement dit, l'aménagement des conditions de pratique ne serait pas destiné à optimiser la paramétrisation du mouvement mais plutôt à aider l'agent à explorer les différentes solutions perceptives que lui offre son environnement. En effet, les travaux de Jacobs et al. (2001) ont montré qu'il était possible d'éduquer l'attention des participants et d'améliorer l'apprentissage d'une tâche perceptive pour peu que l'aménagement des conditions de pratique rende l'utilisation de certaines informations inefficaces. Cette méthode conduisait l'agent à explorer son environnement perceptif et ainsi à découvrir les variables informationnelles les plus pertinentes. Nous pensons qu'une pratique variable pourrait permettre de rendre inappropriée l'utilisation de certaines variables informationnelles afin d'obliger l'agent à découvrir des informations pertinentes pour le contrôle de son action. L'objectif du chapitre 5 de la présente thèse est donc de combiner la variabilité de la pratique et la méthodologie développée par Jacobs et al. (2001) pour favoriser l'apprentissage de la phase d'approche.

Deuxième partie
Chapitres Expérimentaux

CHAPITRE 3

Effets du feedback simultané à la demande sur l'éducation de
l'attention

Self-Controlled Concurrent Feedback and the Education of Attention Towards Perceptual Invariants¹

Abstract

The present study investigates the effects of different types of concurrent feedback on the acquisition of perceptual-motor skills. Twenty participants walked through virtual corridors in which rhythmically opening and closing sliding doors were placed. The participants aimed to adjust their walking speed so as to cross the doors when the doors were close to their maximal aperture width. The highest level of performance was achieved by learners who practiced the task with unambiguous self-controlled concurrent feedback, which is to say, by learners who could request that feedback at wish. Practice with imposed rather than self-controlled feedback and practice without concurrent feedback were shown to be less effective. Finally, the way in which the self-controlled concurrent feedback was presented was also found to be of paramount importance; if the feedback is ambiguous, it may even prevent participants from learning the task. Clearly, unambiguous self-controlled feedback can give rise to higher levels of performance than other feedback conditions (compared to imposed schedule) but, depending on the way it is presented, the feedback can also prevent the participants from learning the task. In the discussion it is argued that unambiguous self-controlled concurrent feedback allows learners to more rapidly educate their attention towards more useful perceptual invariants and to calibrate the relation between perceptual invariants and action parameters.

1. Huet, M., Camachon, C., Fernandez, L., Jacobs, D. M., Montagne, G. (2009). Self-controlled concurrent feedback and the education of attention towards perceptual invariants. *Human Movement Science*, 25, 450-467.

Introduction

Imagine a common perceptual-motor skill, such as cycling, kicking a soccer ball, returning a tennis serve, or driving a car, or yet more common activities such as walking or maintaining postural balance. Most of these skills are learned, and for many skills, the learning never ends. Even the most experienced perceivers and actors can often further improve, or further adapt to changes in the environment, or to changes in their own bodies. It is easy to appreciate the crucial importance of learning in our everyday life (Crossman, 1964; Kottke, Halpern, Easton, Ozel, & Berrill, 1978). Given, then, the fact that learning processes can also be long and costly, it is not surprising that the challenging possibility to facilitate learning has motivated considerable bodies of research, especially in the more applied areas (e.g., Starkes & Ericsson, 2003).

One of the pivotal results of research on learning is that feedback (or instructions) can be decisive for the acquisition of expertise. The converging evidence indicates that feedback is most beneficial if directed towards the environmental consequences of the movement to be produced, rather than towards the movement itself (see Wulf, 2007, for a review). A possible explanation of this finding is that an external focus of attention (i.e., towards the consequences of the movement) allows the movement to be executed on an automatic basis, without more cognitive interferences. The present article therefore focuses on feedback about the environmental consequences of actions. Moreover, we focus on a type of feedback given during the execution of the action (i.e., concurrent feedback), and which learners can ask for at wish (i.e., self-controlled feedback).

Let us first review a few more general findings concerning perceptual-motor functioning and learning. Self-movements and/or movements of objects relative to agents typically result in transformations of ambient energy arrays (e.g., the ambient optic array). In many cases, the perceptual substrate of goal-directed movements has been shown to reside in such transformations (Gibson, 1958; Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001; Warren, 2006). There is also a large body of evidence indicating that learning perceptual-motor skills goes together, among other things, with a shift in which perceptual variable is used to perform the task, from variables weakly correlated to the event under consideration to sources of information highly correlated or even specific to that event, which is to say, to perceptual invariants (e.g., Fajen & Devaney, 2006; Jacobs, Runeson, & Michaels, 2001; Smith, Flach, Dittman, & Stanard, 2001).

In the study of Smith et al. (2001), observers were asked to release a pendulum at an appropriate time in order to create a collision between an approaching ball and a sphere at the end of the pendulum. In this situation, several optic flow variables are related to the temporal closeness of the ball. Whereas the expansion rate of the ball is merely correlated with time to contact, τ , defined as a combination of optical size and expansion rate, specifies time to contact (Lee, 1976). In the course of practice, participants in the study of Smith et al. abandoned the use of lower-order variables (i.e., expansion rate) to the benefit of higher-order variables (i.e., τ). Gibson referred to this tuning toward the more useful perceptual invariants as the education of attention (Gibson, 1966; 1979). With this understanding of learning, our question becomes : What kind of procedures might allow learners to get attuned more quickly to the relevant properties of the perceptual flow ?

Two types of procedures are generally distinguished : explicit and implicit ones. In explicit procedures, performers are asked to focus their attention on specific visual cues. Observers typically aim to predict a forthcoming event, such as the place of arrival of a ball or the direction of a stroke, while several key visual cues are described or highlighted (e.g., the racquet position or speed in the tennis serve ; Farrow, Chivers, Hardingham, & Sachse, 1998). Implicit procedures do not explicitly describe or highlight specific cues (Magill, 1998). These procedures start from the assumption that the information that allows one to perceive an event correctly need not necessarily be located at a specific place (e.g., at the position of the racquet or the position of the feet). Implicit procedures also assume that reliance on informational variables can be achieved implicitly, which is to say, without learners being aware of the informational basis of their actions. The available evidence indicates a superiority of implicit procedures over explicit ones, especially under performance pressure (e.g., Masters, 1992; Liao & Masters, 2001; Koedijker, Oudejans, & Beek, 2007). Moreover, implicit procedures seem to be better suited for the discovery of higher-order perceptual invariants, because these invariants might be difficult to describe explicitly or highlight.

Implicit procedures, also labelled guided discovery procedures, can rely on instructions or on the use of feedback protocols. Williams, Ward, Knowles and Smeeton (2002) tested whether a guided discovery protocol based on instructions improves anticipation skills in tennis. The attention of observers was directed towards potentially informative areas. For example, rather than being informed about the relation of hip orientation and shot outcome, observers were encouraged to focus their attention to the midriff region. The precise relationship between hip orientation and shot outcome hence remained to be discovered by the observers. This procedure

was found to enhance anticipation skills as much as an explicit procedure. Although the implicit procedure used by Williams et al. (2002) was less prescriptive than the explicit procedure tested in the same study, the instructions still led observers to focus on specific areas. Feedback-based procedures, in which such instructions are not given, are in this sense yet more implicit.

Developing a feedback-based procedure was the focus of a study by Jacobs et al. (2001). Participants in this study were shown simulations of colliding balls, and they were asked to judge the relative mass of the balls. As in the study of Smith et al. (2001), the judgments of novice perceivers were based on lower-order variables but, after practice with feedback, perceivers progressed to the use of a higher-order variable that specifies relative mass. In addition, Jacobs et al. (2001) found that perceptual learning proceeds faster if practice is organized so that judgments based on non-optimal sources of information are systematically erroneous. Such practice conditions can be achieved through the selection of stimuli (i.e. collisions) for which the use of non-optimal sources of information leads to particularly inappropriate judgments, and hence to negative feedback. The negative feedback associated with the use of lower-order variables leads perceivers to change in variable use and to discover higher-order perceptual variables. Jacobs and Michaels (2007) later modeled these findings, showing more precisely how the structure of the errors made by observers might guide the learning process.

Recently, Camachon, Jacobs, Huet, Buekers and Montagne (2007) tried to facilitate a feedback-driven shift in the use of perceptual variables using a concurrent feedback procedure. Camachon et al. (2007) used a perceptual-motor task that was previously studied by Buekers, Montagne, de Rugy, and Laurent (1999), Montagne, Buekers, Camachon, de Rugy, and Laurent (2003), and Camachon, Montagne, Buekers, and Laurent (2004b). In these studies, observers walked through virtual corridors and adjusted their walking speed in order to pass through a pair of rhythmically opening and closing sliding doors. This same task has also been studied in a real-world environment (Cinelli & Patla, 2008 ; cf., Cinelli, Patla, & Allard, 2008). The task is of particular interest in the domain of learning because of the strong spatio-temporal constraints that are imposed on the participants, and because of the relatively low levels of performance observed at the beginning of practice, at least for the slightly faster moving doors in the virtual environments.

The adjustments in walking speed that are required to successfully cross the sliding doors depend on the spatiotemporal vicinity of the doors as well as on the cyclical characteristics of the oscillation of the doors. Hence, observers have to discover an

informational variable that allows them to integrate these two processes. Camachon et al. (2007) hypothesized that concurrent feedback might help them to discover such an informational variable. The concurrent feedback used by these authors, provided during the completion of the task, informed about the consequences of the participants' current walking speed if the walking speed would remain constant. More precisely, a gauge presented at the left hand side of the visual scene indicated whether observers would arrive early or late at the door crossing. In spite of this, however, the experiment of Camachon et al. (2007) did not reveal an advantage of concurrent feedback as compared to a learning regimen without concurrent feedback (see their Figure 3).

A possible drawback of the protocol used by Camachon et al. (2007) is that the concurrent feedback was imposed on the observers, who could not control the moment and frequency of the feedback. To date, several studies have revealed an advantage of self-controlled feedback procedures over classical ones for the learning of various perceptual-motor skills, including throwing (Janelle, Barba, Frehlich, Tennant, & Cauraugh, 1997; Janelle, Kim, & Singer, 1995), skiing (Wulf & Toole, 1999), and sequential timing (Chiviawowsky & Wulf, 2002; 2005). The results of the self-controlled feedback studies also show that learners spontaneously opt for a fading schedule : During the acquisition process they call less and less for the feedback (e.g., Janelle 1997, Wulf 1999). This spontaneous strategy prevents the learner from the so-called guidance effect, or feedback dependence (cf., Salmoni, Schmidt, & Walter, 1984). Taken together, these studies provide convincing evidence in favor of the beneficial role of self-controlled feedback designs.

The present study is a continuation of the Camachon et al. (2007) study, with the notable difference that a self-controlled feedback protocol is applied. Thus, participants in the study adjusted their walking speed in a virtual reality environment in order to pass through sliding doors. During the execution of the action, participants had the opportunity to solicit concurrent feedback whenever they wished. The concurrent feedback informed participants about the current relation to the environment. In visualizing the current relation during the trial, participants might be able to more readily access the sources of information that specify this relation. With this study we aim to discover the extent to which self-controlled concurrent feedback helps learners to converge on the perceptual regularities that are required to control the action. We hypothesize that the self-controlled feedback helps the learner to acquire a high level of perceptual-motor expertise. A second aim of the study is to find out to what extent the way in which concurrent feedback is provided affects the learning process. The concurrent feedback was provided to the participants in the

form of a gauge (as in Camachon et al., 2007) or in the form of ghost doors. The gauge was placed on the left-hand side of the visual scene (look ahead to Figure 2A). The ghost doors were placed in the virtual corridors at the position at which participants would be, in the absence of changes in walking speed, at the moment of maximal door aperture nearest to the door crossing (look ahead to Figure 2B). This condition was designed to provide the concurrent feedback in a more natural way than the gauge : The ghost doors are fully embedded in the visual scene. As a consequence we hypothesize that the ghost doors lead to faster learning than the gauge.

Method

Participants

Twenty students (mean age = 24, SD = 2.18) participated in the experiment. All participants had normal or corrected-to-normal vision. They were divided in four experimental groups of equal size (n=5). Participants had no experience with the experimental task and were not informed about the purpose of the study. Informed consent was obtained prior to testing.

Task

Participants were asked to walk through a straight virtual corridor in order to pass through a pair of sliding doors that opened and closed with a frequency of 1 Hz. To this aim, participants moved forward by walking on a treadmill, allowing them to adjust their walking speed if needed. Lateral displacements or stops were not permitted. Feedback indicating success or failure was provided by means of a green square (correct passing) or red square (failure), projected at the center of the screen immediately after each door passing. The purpose of this feedback was to replace the feedback normally available in real life (i.e., in real life participants would bump into the doors or be caught between them when they arrived at the wrong moment). Hence, the success/failure feedback was provided after each door passing in each phase of the experiment, independent of the concurrent feedback that was provided (or not) in the acquisition phase.

Apparatus

The virtual reality set-up (Figure 3.1) consisted of two PC Dell workstations (Optiplex GX 240), a treadmill (Gymrol, Model BRL 1800), a Barco-Projector,

and a 2.3-m high by 3-m wide projection screen. The first PC workstation (control station) was responsible for the data acquisition and the real-time processing via an ADwin-Pro system (Keithley Inc.). The data of the treadmill were fed back to the control station. From these data, the computer calculated the positions of participants in the virtual environment and transmitted these to the second PC workstation (graphics workstation), which generated the modifications in the visual scene that were then projected on the screen with a delay of 30-50 ms. Participants did not perceive time lag between their motion and the movement of the visual scene. The visual scene was projected on the screen, placed 75 cm in front of participants, and was changed at a rate of 60 frames/s.

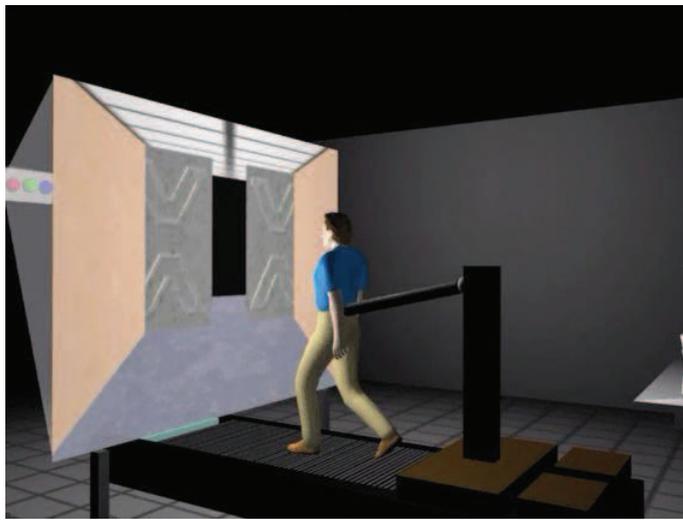


FIGURE 3.1 – Apparatus used in the experiment. The set-up consisted of a treadmill, a projection system including a control station that generated the virtual scene, and a projection screen on which the virtual scene was presented.

Treadmill specificities. Participants walked on the treadmill's moving belt, which was 0.6 m wide and 1.8 m long. They were attached to the framework of the treadmill by means of a belt that was fixed to a rotating axis via a rigid rod. To allow a natural gait, the initial speed of the moving belt was adjusted for each participant. This means that the force generated by the treadmill was chosen so that the additional force generated by the participant would result in a speed of the moving belt approximately equivalent to the speed produced by participants while walking on a normal surface. Participants were asked not to stop or run on the treadmill. The position of the treadmill was measured by means of an optical encoder with a

frequency of 200 Hz, allowing us to calculate the position of the participant in the corridor with a 1 cm precision.

Visual scene specificities. The visual scene consisted of successive corridors which were 10 m long, 3 m wide, and 2.3 m high (see Figures 3.1 and 3.2). A pair of sliding doors was placed in each of these corridors at a distance of 7 m from the entrance into the corridor. We controlled the opening of the doors at the moment at which participants entered the corridor, which means that we controlled the opening that the doors would have at the time of the door crossing if participants would keep their walking speed unchanged. These door-opening conditions were different for each corridor (i.e., trial). The doors opened and closed with a frequency of 1 Hz and with a speed of $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. This resulted in a maximal door aperture of 1.5 m (0.75 m for each door) every other second. All surfaces (walls, floor, ceiling, and doors) were textured to enhance the global flow field.

The Self-Controlled Concurrent Feedback

Concurrent feedback was provided with a self-controlled schedule. Participants could request feedback by pressing a button. When the participants pushed the button, the feedback appeared for one second and then disappeared automatically. The meaning of the feedback was explained to the participants, but they did not receive instructions about the use of the feedback. This means that, for each corridor, they could ask for feedback as often as they wished, and they could also decide not to ask for feedback. The feedback was provided in the form of a gauge or in the form of ghost doors. The two types of feedback gave the same information : a real-time representation of the current error. The current error is defined as the error that would be observed at the door passing if the current walking speed would remain constant. Note that, if the walking speed changed during a trial, the current error changed accordingly. This means that participants were continuously informed about the gap between the current behaviour and the behaviour required to reach the desired goal.

The first type of concurrent feedback was materialized by a gauge (Figure 3.2.A). The gauge was located on the left hand side of the visual scene and drawn as a vertical reference bar. The middle part of the reference bar was green and indicated that the upcoming door-passing would be accurate. The upper and lower parts were red. The red parts indicated that the participant would arrive early (upper part) or late (lower part) if the walking speed remained constant. A pointer embodied by two small triangles placed on each side of the gauge indicated, in real-time, the cur-

rent error as calculated from the displacement of the participant. The further away the pair of triangles was from the green zone, the greater the amount of current error.

A second type of concurrent feedback was materialized by ghost doors (Figure 3.2.B). The ghost doors indicated where the participant would be, given the current walking speed, at the moment of the maximal door aperture nearest to the moment of door crossing. When the ghost doors were near enough or perfectly layered on the real doors, they were green. This indicated that the future door passing would be accurate. When the ghost doors appeared in front of the real doors, in red, this indicated that the participant would arrive late. Finally, when the ghost doors appeared behind the real doors, in red, this indicated that the participant would arrive early. The further away the ghost doors were from the real door, the greater the amount of current error.

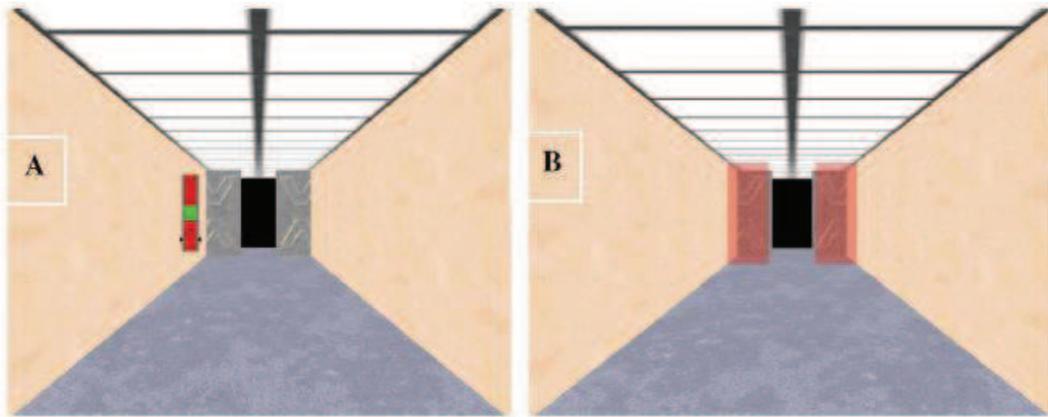


FIGURE 3.2 – Visual scene during a trial performed with concurrent feedback. The feedback was materialized in the form of a gauge (A) or in the form of ghost doors (B).

Procedure

The experiment started immediately after a short familiarisation period, during which participants were asked to walk on the treadmill as naturally as possible. The experiment consisted of a pretest, an acquisition phase, and a retention test. The pretest was run on the first day and consisted of one block of 30 trials without concurrent feedback. The acquisition phase consisted of six blocks of 30 trials per

day, during a four-day period, resulting in a total of 720 trials. The different experimental groups received different types of concurrent feedback during the acquisition phase. An additional block of 30 trials without concurrent feedback was performed at the end of each daily session of the acquisition phase. Finally, a 30 trial retention test without concurrent feedback was run the day after the last day of acquisition.

There were four experimental groups : ghost doors, gauge, yoked, and control. During the acquisition phase, the ghost doors and gauge groups could have access to concurrent feedback using a self-controlled schedule. When participants in the ghost doors group pushed the button, feedback appeared in the ghost doors form, and the gauge group received the concurrent feedback in the gauge form. The yoked group followed an imposed feedback schedule. We associated a participant in the gauge group to each participant in the yoked group. For each trial of each gauge-group participant, we recorded how many times and when the feedback was requested. Yoked group participants received the feedback schedule recorded for their associate from the gauge group. This procedure was scheduled after a close inspection of the results of the gauge and ghost doors groups. We used the results of the gauge group for the procedure because the gauge group showed more interesting learning effects than ghost doors group. The control group did not receive concurrent feedback at all.

Data Reduction

The data were analyzed with regard to performance outcome and movement kinematics. For performance outcome, the percentage of correct door passing was calculated as a measure of success rate. A door passing was considered successful if participants arrived at the doors between 75% (i.e., 112.5 cm) of maximal aperture during the opening phase and 87.5% (i.e., 131.25 cm) of maximal aperture during the closing phase. With regard to the movement kinematics, we first computed the variability in walking speed. The within-subjects standard deviations of the speed profiles were computed for the last six successive 0.5 s time-to-passing intervals before door passing. The rationale for using this variable is that visually driven regulations of displacements make behaviour more variable in the vicinity of the target. This variable hence locates visual regulations of the displacement. However, it does not account for the functionality of the regulations.

A second aspect of the movement kinematics that we considered was the variability in current error. Recall that the current error is the error that would be observed at the door passing if the current walking speed would not change. Hence,

if the speed changed, the current error changed as a result. The current error was also computed for the last six 0.5 s intervals of each trial and was used to examine how participants regulated their approach. A convergence of the current error towards zero indicates that the changes in walking speed were functional. In sum, an increase of the variability in walking speed together with a decrease of the variability in current error indicates adaptive changes in walking speed. Note that the current error was equal to the concurrent feedback.

Participants have to access at the same time the spatial-temporal vicinity of the doors and the cyclical characteristics of the oscillating doors to accommodate the future. The integration of these two processes is probably key parameters and justifies the use of self-controlled concurrent feedback designs to try to help the learner to identify the perceptual information he/she needs to succeed in the task. Therefore, the feedback data were analyzed through the frequency of request, the moment of request, and the variability in current error at the moment of request. The frequency of the requests was expressed as a percentage (i.e., [number of request per days/total number of request] * 100). This percentage was calculated for each day of the acquisition phase and for each participant in the gauge and ghost doors groups, permitting a view on the evolution of the feedback requests over days of practice. The moments of the requests were analyzed as follows. The trials were divided in periods of 1 s. For each period, the requests were counted and expressed as a percentage of the total number of requests from that participant in the acquisition phase, permitting a view on the within-trial evolution of the feedback request.

Finally, for trials in which the feedback was requested several times, we computed the between-trials variability in current error at the moment of each request. We first sorted the trials in four groups on the basis of the number of requests per trial (2, 3, 4 and 5 requests). Then, for each group of trials and for each request rank, we computed the variability in current error at the moment of the request. For example, we first selected the trials in which the feedback was asked three times. Next, we selected the first requests of these trials and computed the variability in the current error at the moments of these requests. The operation was repeated for requests of rank 2 and 3, allowing us to compare the variability in current error for the different request ranks. A decrease in the variability from one request to another would indicate the use of concurrent feedback to produce functional regulations. Comparing the use of the feedback by participants in the gauge group and the associated participants in the yoked group was particularly appealing in this regard.

For statistical analysis, the significance level was set at $p = .05$. All trials (suc-

successful and missed) were considered. Partial effect sizes were computed (η^2) and, when necessary, a posteriori comparisons were conducted to determine the nature of the observed effects.

Results

Performance

Pretest. We conducted a one-way ANOVA with Group as between-subjects factor and success rate as dependent variable (Figure 3.3). As expected, the pretest performance of the groups did not differ significantly ($F_{(3,16)} = 0.30, p = .82$)².

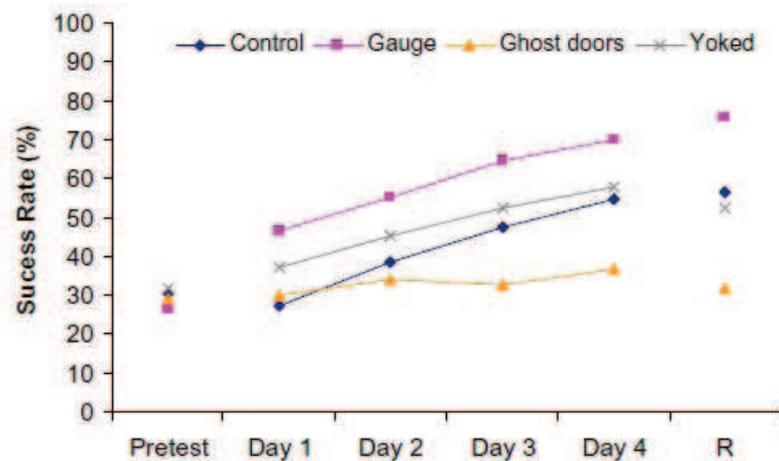


FIGURE 3.3 – Performance scores for each group (control, gauge, ghost doors and yoked) in the pretest, acquisition phase (Days 1-4), and retention test (R). The data presented for Days 1-4 concern the additional blocks without concurrent feedback.

Acquisition. A two-way ANOVA with Day as within-subjects factor and Group as between-subjects factor was performed with success rate as dependent measure (Figure 3.3). This analysis concerns the daily blocks of 30 trials without concurrent

2. Note that the ANOVAs in Sections Performance and Kinematics use group as a between-subjects factor. Our experimental design also allows the gauge and yoked groups to be compared with group as a within-subjects factor. However, the improvements due to the increased power of such repeated-measures designs were found to be negligible. We therefore chose not to report such additional analyses.

feedback that were run after the blocks with concurrent feedback. The analysis revealed significant effects of Day ($F_{(3,48)} = 22.12, p < .001, \eta^2 = 0.30$) and Group ($F_{(3,16)} = 5.88, p = .007, \eta^2 = 0.20$). The Day x Group interaction was also significant ($F_{(9,48)} = 2.26, p = .03, \eta^2 = 0.09$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) indicated that the performance increased significantly for the gauge, control, and yoked groups. Conversely, there was no significant increase for the ghost doors group.

Let us also mention the performance results for the five daily blocks of practice in which the concurrent feedback was actually given (not shown in Figure 3.3). For the gauge group, performance on those blocks increased from 56% on Day 1 of the acquisition phase to 66% on Day 4, and for the ghost doors, yoked, and control groups these percentages were 30 and 53, 43 and 50, and 28 and 54, respectively. These percentages are interesting among other reasons because they indicate that the practice conditions did not suffer from ceiling effects.

Retention Test. A two-way ANOVA with Group (ghost doors, gauge, yoked, and control) as between-subjects factor and Test Phase (pretest, retention test) as within-subjects factor was performed with success rate as dependent measure (Figure 3.3). The main effect of Test Phase was significant ($F_{(1,16)} = 45.52, p < .001, \eta^2 = 0.42$). The main effect of Group ($F_{(3,16)} = 11.74, p < .001, \eta^2 = 0.15$) and the Group x Test interaction ($F_{(3,16)} = 6.92, p = .003, \eta^2 = 0.19$) were also significant. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed an increase in performance from pretest to retention test only for the yoked, control, and gauge groups. Moreover, this increase in performance was more pronounced for the gauge group (26%-76%) than for the yoked (32%-52%) and control (30%-56%) groups.

In sum, self-controlled feedback can give rise to higher levels of performance than other feedback conditions (gauge group compared to yoked group) but, depending on the way it is presented, the feedback can also prevent the participants from learning the task (ghost doors group).

Kinematics

We conducted two three-way ANOVAs, one on the variability in walking speed and one on the variability in current error. Both analyses used Group (ghost doors, gauge, yoked, and control) as between-subjects factor and Test Phase (pretest, retention test) and Time-to-Passage (3.0, 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, .5, and 0 s) as within-subjects factors.

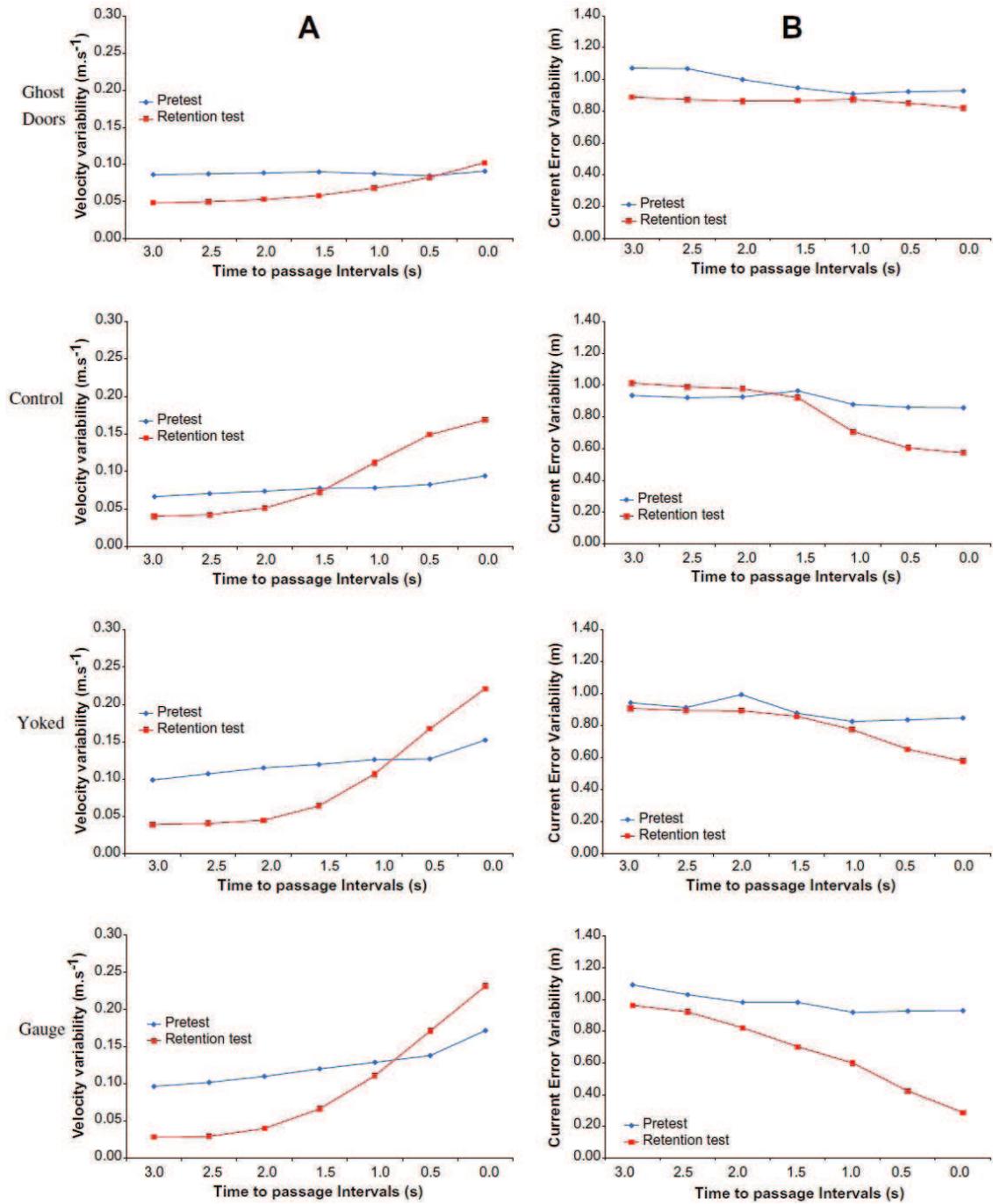


FIGURE 3.4 – Variability in walking speed (A) and current error (B), for the four experimental groups (ghost doors, control, yoked, and gauge), in pretest and retention test

Variability in walking speed. The main effect of Time-to-Passage ($F_{(6,96)} = 56.39, p < .001, \eta^2 = 0.30$), the Group x Time-to-Passage interaction ($F_{(18,96)} = 4.10, p < .001, \eta^2 = 0.06$), and the Test Phase x Time-to-Passage interaction ($F_{(6,96)} = 30.90, p < .001, \eta^2 = 0.12$) were significant. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) showed that the variability in walking speed increased in the vicinity of the doors in the retention test, for all groups (Figure 3.4.A). We did not observe a significant increase in walking-speed variability in the pretest. This result seems to indicate that participants regulated their walking speed in the vicinity of the doors only in the retention test.

Variability in current error. Significant main effects were found for Test Phase ($F_{(1,16)} = 15.42, p < .001, \eta^2 = 0.14$) and Time-to-Passage ($F_{(6,96)} = 15.34, p < .001, \eta^2 = 0.19$). The Test Phase x Time-to-Passage interaction ($F_{(6,96)} = 8.62, p < .001, \eta^2 = 0.04$), Time-to-Passage x Group interaction ($F_{(18,96)} = 3.24, p < .001, \eta^2 = 0.04$), and Test Phase x Group x Time-to-Passage interaction ($F_{(18,96)} = 2.71, p < .001, \eta^2 = 0.04$) were also significant. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) showed that, in the retention test, the current error variability decreased in the vicinity of the doors for the control, yoked, and gauge groups, whereas it did not seem to decrease for the ghost doors group (Figure 3.4.B). The decrease in variability appeared significantly earlier for the gauge group (1 s before crossing) than for the control and yoked groups (0.5 s before crossing). No significant decreases in current error were observed in the pretest.

Current Error Profile

The current error profiles presented in Figure 3.5 further illustrate the regulation behaviour. The figure reveals that the regulations are different for these representative participants in the different experimental groups. The participant in the gauge group produced adaptive changes in walking speed : The systematic convergence of the current error in the vicinity of the doors shows that the changes in walking speed were in agreement with the speed changes required to succeed in the task. For the participants in the control and yoked groups, the regulations were less pronounced. Walking speed regulations were made in order to reduce the current error, but the changes were often not sufficient to ensure successful performance. Moreover, the decrease in variability in current error was less anticipated than the ones produced by the participant in the gauge group (see also Figure 3.4.B). This behaviour leaves less time to perform the necessary regulations to cross the doors successfully. The current errors of the participant in the ghost doors group did not seem to change much at all ; these participants maintained his or her walking speed globally unchanged.

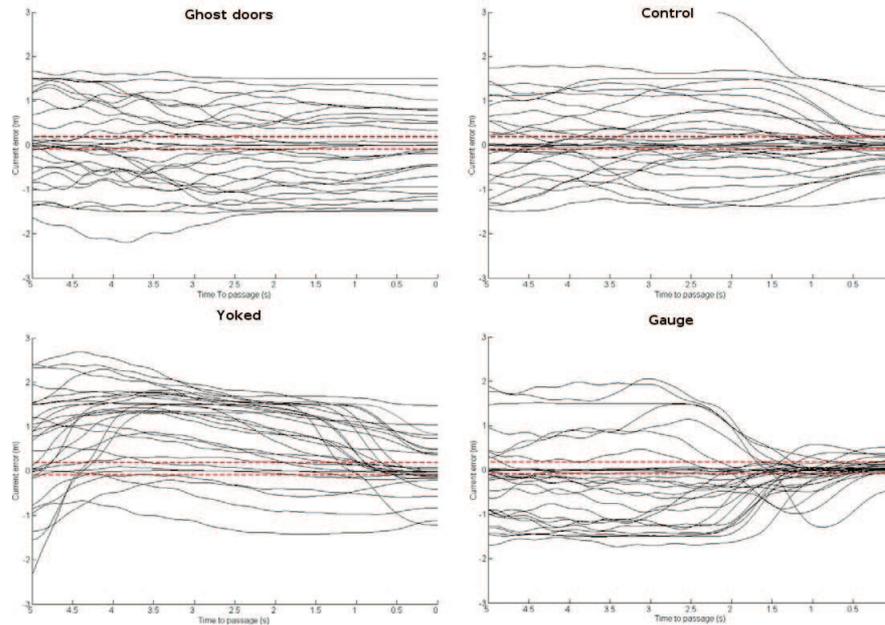


FIGURE 3.5 – Current-error profiles recorded in the retention test for a representative participant in each group. The dotted lines indicate the intervals that allow successful doors crossing. A positive error means that the participant will have walked to far at the considered moment of maximal door aperture, and a negative error means that the participant will not have walked far enough at that moment.

Use of Feedback

Feedback data were analyzed with regard to the frequency of request, the moment of request, and variability in current error at the moment of request.

Frequency of Request. We conducted a two-way ANOVA with Group (ghost doors, gauge) as between-subjects factor and Day (Days 1-4) as within-subjects factor and with the percentage of feedback requests as dependent variable (Figure 3.6). The analysis revealed a main effect of Day ($F_{(3,24)} = 12.27, p < .001, \eta^2 = 0.46$) and a significant Group x Day interaction ($F_{(3,24)} = 6.03, p = .003, \eta^2 = 0.22$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed that the frequency of request decreased significantly during the acquisition phase for the gauge group (from 55% to 5%), but not for the ghost doors group (from 29% to 20%)³.

3. The total number of requests was 3747 for the gauge group and 7773 for the ghost-doors group

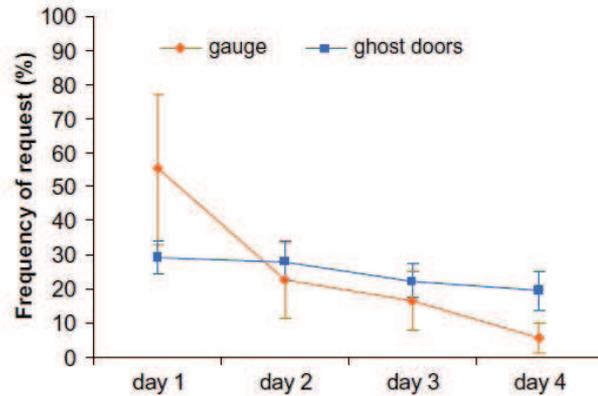


FIGURE 3.6 – Frequency of request during acquisition phase for ghost doors and gauge groups. These percentages are computed with regard to the total number of requests per group. The total numbers of requests were 7773 and 3747, respectively, for the ghost doors and gauge groups.

Note the between-subjects variability shown in Figure 3.6. The relatively low levels of variability in the ghost doors group reveal the fact that all the participants in this group frequently asked for feedback throughout the acquisition phase (approximately 400 requests per participant per day). On the other hand, the large variability in the gauge group reveals different strategies among the participants in this group, particularly during the first day of the acquisition phase. While some participants in the gauge group relied extensively on feedback during the entire first day, others showed this degree of dependence on the feedback only in the first few trials.

Moment of request. The previous section showed that the frequency of the requests differed across participants in the gauge group. We now illustrate with a few examples that the moments of the requests were also different for different observers. Figure 3.7 presents the results of three participants. The figure presents data for the entire acquisition phase of each participant because, for a given participant, the main difference from one day to another was a gradual decrease in the total number of requests (look back to Figure 3.6); the qualitative pattern of the distributions did not appear to change from day to day.

The first participant asked for feedback mainly from 9 to 4 s before crossing the doors (Figure 3.7.A). Requests in the last two seconds were rare for this participant.

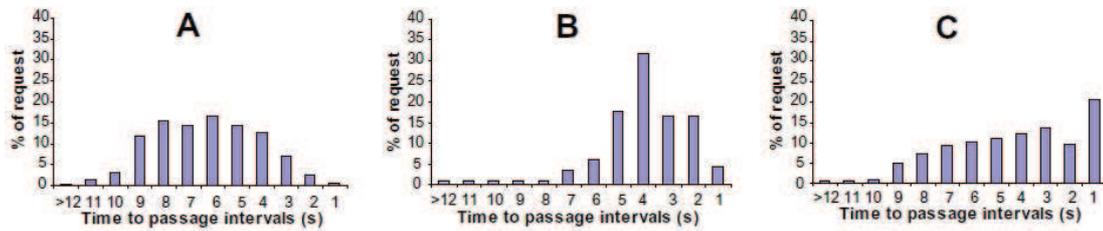


FIGURE 3.7 – Distribution of feedback requests during the approach for three participants in the gauge group.

In contrast, the second participant (Figure 3.7.B) frequently asked for feedback in the vicinity of the doors (mainly between 5 and 2 s before crossing the doors). Finally, for the third participant (Figure 3.7.C), the frequency of requests gradually increased, up to a maximum at about 1 s before crossing the doors. Let us also mention that, despite the differences in the frequency and the moments of the requests, these three participants all reached a high level of performance; their rates of success in the retention test were 70%, 73%, and 83%, respectively.

Evolution of the current error variability across successive requests. We analyzed this variable to check if consecutive feedback requests allowed a functional reduction of the current error, and to compare the outcomes for the voluntary request of the gauge group with the imposed request of the yoked group. Let us first describe the results qualitatively. Figure 3.8 gives the results for two pairs of participants (left and right panels, respectively) and for trials in which 2, 3, 4, and 5 feedback requests occurred (i.e., the panels in the successive rows of the figure). Filled squares represent a participant in the gauge group and filled diamonds represent the associated participant in the yoked group. Both participants in the gauge group showed a systematic decrease in the current-error variability from one request to another, independently of the number of requests that occurred in the trial. This illustrates that participants in the gauge group took advantage of the concurrent feedback and produced functional adaptations. The figure also illustrates that participants in the yoked group exhibited important differences in the way they use the (imposed) concurrent feedback. Whereas some of them took as much advantage of the concurrent feedback as the associated participant in the gauge group (i.e., right panels of Figure 3.8), others did not (i.e., left panels of Figure 3.8).

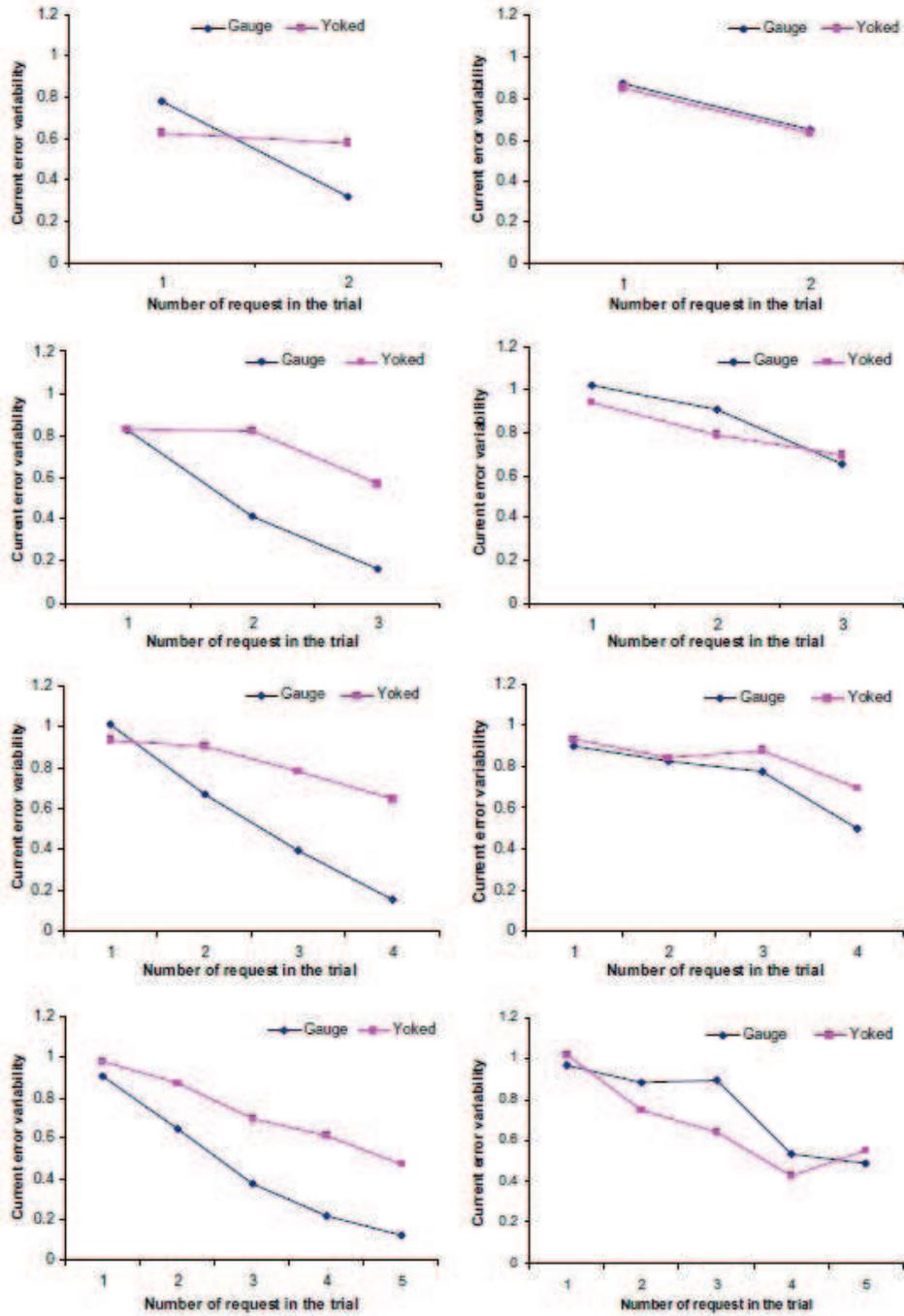


FIGURE 3.8 – Variability in current error at the time of each feedback request as a function of the number of requests in the trials (2, 3, 4 and 5 demands) for two participants in the gauge group and the associated participants in the yoked group.

To test these findings we first performed a two-way ANOVA on the variability in current error for the group of trials with two requests, with Request Rank (1, 2) and Group (gauge, yoked) as within factors. The main effect of Request Rank ($F_{(1,4)} = 48.11, p = .002, \eta^2 = 0.60$) and Request Rank x Group interaction ($F_{(1,4)} = 7.76, p = .049, \eta^2 = 0.14$) were significant. Indeed, the variability in current error decreased over the requests, and this decrease was more pronounced in the gauge group than in the yoked group. Similar results were obtained by ANOVAs performed for the groups of trials with 3, 4, and 5 requests.

Discussion

The present study was designed to investigate to what extent self-controlled concurrent feedback helps learners to discover the perceptual regularities needed to control a goal-directed action. Participants in the study aimed to regulate their walking speed so as to pass through sliding doors. We tested four experimental groups : The gauge and ghost doors groups received self-controlled concurrent feedback, a control group did not receive concurrent feedback, and participants in the yoked group received the feedback as it was requested by associated participants in the gauge group. In addition, for each group, success/failure feedback was given after the trials. We hypothesized that performance would improve with practice and that the highest levels of perceptual-motor expertise would be observed after practice with self-controlled concurrent feedback.

Performance indeed improved with practice, at least for the gauge, yoked, and control groups. The improvements from pretest to retention test were the consequence of the appearance of functional changes in walking speed in the vicinity of the door crossings. This is in agreement with previous studies that used the same door crossing task (e.g., Montagne et al., 2003). The present study also shows that the use of self-controlled feedback can affect the learning process and that the way in which self-controlled feedback is provided is of paramount importance : Whereas the gauge group outperformed all other groups, the ghost doors group was outperformed by all other groups, including the control group.

The positive effect of self-controlled concurrent feedback observed for the gauge group confirms our hypothesis. The finding is in agreement with a number of studies that used different tasks and different types of self-controlled feedback (e.g., Janelle et al., 1997 ; Wulf & Toole, 1999 ; Chiviakowsky & Wulf, 2002). As in the studies by Janelle et al. and by Wulf & Toole, observers in our gauge group spontaneously

opted for a fading schedule. The fading schedule probably allowed them to avoid feedback dependence (cf., Salmoni et al., 1984).

The Ambiguity of the Ghost Doors Condition

We did not expect the poor performance of participants who practiced with concurrent feedback in the form of ghost doors. Apparently, ghost doors feedback provided ambiguous information, possibly due to (a) opposite info, (b) poor specification of magnitude of the error and (c) interference with more natural optic flow information.

First, one might hypothesize that this unexpected result is due to the misinterpretation of the direction of the concurrent feedback. In spite of the written instructions and the explanations given before the experiment, the participants may have interpreted ghost doors in front of the real doors as indicating too early rather than too late arrivals. If so, the changes in walking speed exhibited after feedback requests should be the opposite of the ones required to succeed in the task, especially at the beginning of practice. Additional analyses performed in the first day of acquisition revealed that 70% of the changes in walking speed after feedback requests were functional (i.e., reduced the current error). This percentage increased up to 100% in the following days, making it less likely that the poor performance was related to the misinterpretation of the direction of the current error.

An alternative hypothesis holds that the poor performance in the ghost doors condition is due to the poor specification of the magnitude of the error. The ghost doors informed about the magnitude of the error through the distance between the ghost doors and the to-be-crossed sliding doors. This distance might have been difficult to detect especially in the first part of the trial, when the participants were far away from the doors. In the gauge condition, in contrast, the magnitude of the error was indicated by the vertical distance between the triangles to the center of the green zone (see Figure 3.2), which seems to be much easier to detect. It is also possible that the information provided by the ghost doors interfered with the more natural optic flow information, making it more difficult for the participants to identify the information available in the optic flow. In sum, ghost doors participants might have spent more time to disambiguate the feedback than to learn the task, with the consequence that they were not able to perform the task in the absence of feedback, not even after considerable amounts of practice.

The Education of Attention and Flow Information about Current Error

In the preceding we have shown that practice designs with self-controlled concurrent feedback enhance learning, provided that the concurrent feedback is unambiguous. It remains to be established how observers make use of the feedback. As described in the introduction, several studies have shown that learning goes together with a shift from less useful to more useful informational variables (e.g., Jacobs et al., 2001 ; Smith et al., 2001). It is likely that such a feedback-driven shifts towards the more useful optic flow variables are responsible also for part of the improvements in performance in the present experiment (cf., Camachon et al., 2007). Which informational variables might constitute the informational basis of the walking speed regulations observed in the present task ?

The door crossing task consists of two processes that occur at the same time : The observer approaches the sliding doors and the doors rhythmically open and close with a constant frequency. Information related to the time until the observer reaches an object, in our case the doors, has been addressed in a considerable number of studies (e.g., Lee, 1976). Assuming a constant walking speed, the time-to-door-crossing is specified for instance by tau-like variables. Given the regular (linear) rhythmic movement of the doors, the successive moments of maximal aperture are also specified in the optic flow. Hence, the current error is specified by a compound variable that includes both previous specifications. To give an example, if the time-to-door crossing coincides with a time-to-maximal-aperture, the current error is zero.

Even though an informational specification of the current error exists, this information is difficult to detect. After practice, the gauge, yoked, and control groups were sensitive to the information only shortly before the door crossing, as shown by their adaptive regulations in walking speed, whereas the ghost doors group did not show such sensitivity at all. In addition, none of the groups showed any sensitivity to the information before practice. We therefore conclude that the informational specification of the current error is difficult to detect (and use) earlier than a few opening and closing cycles of the sliding doors before the door crossing. This conclusion is further supported by findings reported in Montagne et al. (2003) and Camachon et al. (2007).

Note that the precise embodiment of the perceptual information that is exploited in this task remains to be discovered by future research. It is not known, for instance, to what extent participants rely on local or global specifications of the time-to-door-crossing (Kaiser & Mowafy, 1993 ; cf., Bootsma & Craig, 2002), and whether they

rely on the angular movement of the doors or on texture deletion and accretion (i.e., occlusion and disocclusion ; Gibson, 1979) to perceive the opening and closing rhythm. It might be informative in this regard to test the transfer of performance to impoverished environments (e.g., with only the moving doors visible). Moreover, possible interactions between the transfer of performance to different task conditions and practice with different types of feedback could also be important for more applied purposes.

Early and Late Feedback Requests and Calibration

Remember that one can distinguish early requests (from 10 to 5 s before crossing) and late requests (from 5 s before crossing onwards) in our results. Early requests were as frequent as late requests. This is surprising because the perceptual information underlying the control of the action seems to be accessible only in the vicinity of the door crossing and, relatively, the walking speed regulations tend to occur shortly before the door crossing. This means that only the late feedback requests can be associated to the education of attention toward the more useful informational variables. Why, then, do observers show so many early feedback requests ? One might hypothesize that the function of early and late requests is very different. Whereas late requests might subserve the education of attention, early requests may underlie some type of perceptual-motor calibration (cf., Jacobs & Michaels, 2007).

Imagine an observer who briefly accelerates (or decelerates) and thereafter relaxes to the speed at which he or she walked before the acceleration. In such a situation, accelerations that occur early or late in the trial have the same effect on the current error ; one just gains (or loses) some time with respect to not accelerating. This means that early feedback requests might be as useful as late feedback requests to discover the relation between particular accelerations and particular changes in current error (expressed by the gauge). One might therefore speculate that the early feedback requests allow some type of calibration between the current error and the required acceleration pattern. If so, early and late requests might be complementary in the sense that they allow learners to become attuned to the relevant perceptual information (late requests), and also to calibrate the information to action parameters (early requests).

Active Perception and Active Learning

Our final question is : Why did the yoked group show these beneficial effects of the concurrent feedback only to a reduced extent ? Part of the answer can be

found in the large inter-individual variability in the feedback requests. The variability seems to reflect the different needs of different learners. For instance, while some participants in the gauge group showed more early requests, others showed more late requests. Obviously, participants in the yoked group were more passive in the sense that they could not choose when to receive the feedback. Some participants in the yoked group who received more late requests might in fact have shown more learning with more early requests, and vice versa.

These findings are reminiscent of the numerous studies that have revealed the active role played by perceivers to extract perceptual information (e.g., Turvey, Burton, Amazeen, Butwill, & Carello, 1998; Amazeen, Amazeen, Post, & Beek, 1999). Such results are consistent with Gibson's (1979) direct perception theory, which holds, among other things, that we perceive to act and also act to perceive. The present study shows that the active role played by observers subserves learning as well as perceiving (cf., Morice, Siegler, Bardy, & Warren, 2007). One interpretation is that, in addition to actively extracting perceptual information, observers actively search for and extract information that might guide their learning (cf., Jacobs & Michaels, 2007). In any case, the present experiment seems to indicate that we act to learn as well as we learn to act.

Concluding Remarks

Taken together, our results indicate that easily detectable and unambiguous self-controlled concurrent feedback can help learners (1) to discover the perceptual regularities that they need to control goal-directed displacements and (2) to calibrate the perceptual-motor system. Of course, this experiment is just one of the first attempts to determine the role of self-controlled concurrent feedback in the acquisition of complex perceptual-motor skills. Additional experiments are necessary to establish with more precision how practice should be organized to optimize perceptual-motor learning. Such experiments should also focus on the relevance of this kind of method for more practically relevant tasks, including, for instance, landing aircraft and negotiating intersections, in which learning is often long and costly, and for which every possibility to avoid human error should indeed be considered.

CHAPITRE 4

Effets du feedback simultané sur l'apprentissage de la phase
d'approche

Self-Controlled Concurrent Feedback Facilitates the Learning of the Final Approach Phase in a Fixed-Base Flight Simulator¹

Abstract

Objective : This study (1) compares the effectiveness of different types of feedback for novices who learn to land a virtual aircraft in a fixed-base flight simulator and (2) analyzes the informational variables that learners come to use after practice. **Background** : An extensive body of research exists concerning the informational variables that allow successful landing. In contrast, few studies have examined how the attention of pilots can be directed towards these sources of information. **Method** : Fifteen participants were asked to land a virtual Cessna 172 on 245 trials trying to follow the glide-slope area as accurately as possible. Three groups of participants practiced under different feedback : with self-controlled concurrent feedback (the self-controlled group), with imposed concurrent feedback (the yoked group), or without concurrent feedback (the control group). **Results** : The self-controlled group outperformed the yoked group that, in turn, outperformed the control group. Removing or manipulating specific sources of information during transfer tests had different effects for different individuals. However, removing the cockpit from the visual scene had a detrimental effect on the performance of the majority of the participants. **Conclusions** : Self-controlled concurrent feedback helps learners to more quickly attune to the informational variables that allow them to control the aircraft during the approach phase. **Applications** : Knowledge concerning feedback schedules can be used for the design of optimal practice methods for student pilots and knowledge about the informational variables used by expert performers has implications for the design of cockpits and runways that facilitate the detection of these variables.

1. Huet, M., Jacobs, D.M., Camachon, C., Goulon, C., Montagne, G. (2009). Self-Controlled Concurrent Feedback Facilitates the Learning of the Final Approach Phase in a Fixed-Base Flight Simulator. *Human Factors*, 51, 858-871.

Introduction

Landing is the most critical phase of visually controlled flights (Langewiesche, 1944; Mulder, Pleijsant, van der Vaart, & van Wieringen, 2000). Wiener (1988), for instance, reported that 30% of the crashes in commercial aviation occur during the final approach and landing, even though these phases account for less than 4% of the total flight time. A main cause of landing accidents is that pilots sometimes rely on sources of information that lead them to misperceive the altitude of the aircraft or the angle of approach to the runway (Gibb, 2007). However, useful informational variables are typically available, even under fairly impoverished circumstances (Galani, Jennings, & Beckett, 1998; Gibson, Olum, & Rosenblatt, 1955; see below for a detailed presentation of these variables). How can one focus the attention of pilots toward these more useful sources of information? The present study addresses this question. We aim to apply recent advances in theories of perceptual learning to the design of practice conditions in a fixed-base flight simulator (cf., Lintern, 1995).

Landing consists of three subtasks. First, in the *base-to-final turn*, the flight direction of the aircraft is aligned with the runway (Beal & Loomis, 1997). Second, in the *approach phase*, the pilot gradually decreases speed and altitude in order to reach the beginning of the runway with a reasonable speed and approach angle (Lintern, 2000). Finally, just before ground contact, the aircraft is tilted slightly nose-up in a maneuver that is called the *landing flare* (Mulder et al., 2000). The approach phase and landing flare are the more dangerous subtasks (Benbassat & Abramson, 2002; Gibb, Schvaneveldt, & Gray, 2008). A common type of accident during the approach phase is due to the black hole illusion : in the absence of distinguishable ground features pilots have been shown to overestimate the actual height of the aircraft, often resulting in too low flight trajectories (Gibb, 2007; cf., Palmisano & Gillam, 2005).

To assist pilots with the landing task, some airports are equipped with Precision Approach Path Indicators (PAPI). As shown in Figure 4.1, the PAPI consist of four red or white lights that indicate the aircrafts Current Glide Slope (CGS). Two red lights and two white lights indicate that the aircraft flies in the correct glide-slope area ($2.5^\circ < \text{CGS} < 3.1^\circ$), three red lights or four red lights indicate that the aircraft flies below the optimal glide path ($2.3^\circ < \text{CGS} < 2.5^\circ$ or $\text{CGS} < 2.3^\circ$, respectively), and three white lights or four white lights indicate that the aircraft flies above the optimal path ($3.1^\circ < \text{CGS} < 3.3^\circ$ or $3.3^\circ < \text{CGS}$).

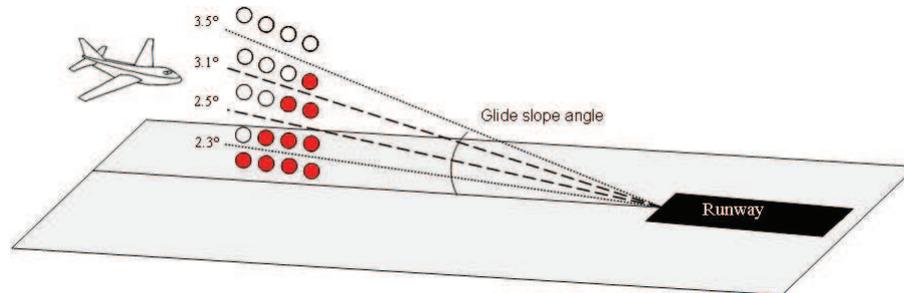


FIGURE 4.1 – Different glide slopes and the PAPI as seen from the areas defined by these slopes. The area between the dashed lines is the correct glide-slope area. Pilots are expected to follow this area in order to land the aircraft. In the experiment the PAPI were located on the ground surface next to the aiming point, as in real-world situations.

Pilots must also be able to control the approach on the basis of more natural information, among other reasons because PAPI or similar devices are not available at all airports. Which sources of information are available? A first type of information can be found in the optic flow (Gibson et al., 1955). Optic flow can be characterized as a vector field. Each flow vector indicates how the projection of a point moves due to the motion of the aircraft. Higher-order patterns in the flow specify properties that are of interest to the pilot. For instance, the point toward which the aircraft is heading is specified by the focus of the optical expansion, and the glide-slope angle is specified by the angle between the focus of expansion (the aiming point) and the line at which the flow vectors diminish (the horizon; see also the definition of the H-angle below).

A second type of information can be found in the perspective structure of the ground texture. Consider, for example, the projections of lines that are parallel to the direction of motion. The angles formed by such projections at the vanishing point are called splay angles. The higher an aircraft flies, the smaller the splay angles. Splay angles thereby carry information about flight altitude and changes therein (Flach & Warren, 1995). Information related to altitude is also available through the projections of lines that are perpendicular to the direction of motion (i.e., through depression angles; Flach, Warren, Garness, Kelly, & Stanard, 1997) and, more generally, through gradients of texture elements with a stochastically-regular size distribution (Lintern, 2000). Kraft (1978) claimed that information about altitude is indeed required during the approach phase. Furthermore, Lintern and Walker (1991)

showed that the presence of ground texture improves the accuracy of approach performance, and Lintern and Liu (1991) showed that texture improves the detection of other sources of information such as the position of the horizon.

Glide-slope information is available also in more impoverished environments in which the runway is the only visible element. For instance, a particular angle of approach goes together with a particular length-over-width ratio of the optical projection of the runway, a ratio referred to as form ratio. Consistent with the use of the form ratio, pilots have been reported to execute lower approaches to narrow or long runways as compared to wide or short runways (Mertens, 1981; Mertens & Lewis, 1982). Two final informational variables that have been argued to be used in the approach phase are (1) the angle between the horizon and the aiming point and (2) the angle between the aiming point and an arbitrary point on the aircraft, both as seen from the perspective of the pilot (Langewiesche, 1944). These angles are referred to as the absolute H-angle and the relative H-angle, respectively (cf., Galanis et al., 1998 ; Galanis, Jennings, & Beckett, 2001 ; Lintern & Liu, 1991).

In sum, information about glide slope is available during informationally-rich daylight approaches as well as during approaches in more impoverished environments. However, the different types of accidents show that pilots do not always detect and/or use the information. Would it be possible to orient their attention to the appropriate variables? Several studies indicate that this might indeed be possible (Fajen & Devaney, 2006 ; Jacobs, Runeson, & Michaels, 2001 ; Michaels, Arzamarski, Isenhower, & Jacobs, 2008). Fajen and Devaney used an emergency braking task. Participants in their study drove through a virtual environment and were asked to wait as long as possible and then to brake strongly so as to stop as closely as possible to the stop sign. With practice, participants abandoned the use of less useful variables (i.e., expansion rate) to the benefit of more useful variables (i.e., time to contact or tau ; see Lee & Reddish, 1981, for a definition of tau). This shift toward the more useful perceptual invariants is referred to as the education of attention (Gibson, 1966; 1979).

Several factors affect the speed with which learners converge toward the more useful sources of information (e.g., Camachon, Jacobs, Huet, Buekers, & Montagne, 2007 ; Fajen & Devaney, 2006 ; Jacobs et al., 2001 ; Lintern, 1980; 1995 ; Lintern & Koonce, 1991; 1992). Camachon et al., for instance, tried to facilitate the acquisition of perceptual-motor skills with concurrent feedback (i.e., feedback given during the execution of the trial). Participants in their study walked through virtual corridors and adjusted their walking speed in order to pass through rhythmically opening and

closing sliding doors (cf., Montagne, Buekers, Camachon, de Rugy, & Laurent, 2003 ; Cinelli & Patla, 2008). The concurrent feedback indicated whether observers would arrive early or late at the door crossing if the walking speed would remain constant. The study did not show a beneficial effect of the concurrent feedback. Camachon et al. attributed this result to the fact the concurrent feedback was imposed rather than self controlled (i.e. the learners could not control when they received the feedback).

Self-controlled procedures have been shown to have an advantage for terminal feedback (Janelle, Barba, Frehlich, Tennant, & Cauraugh, 1997 ; Wulf & Toole, 1999 ; Chiviakowsky & Wulf, 2002; 2005). Huet, Camachon, Fernandez, Jacobs, and Montagne (2009a) used the same door-crossing task as Camachon et al. (2007) to test a self-controlled procedure in combination with concurrent feedback. A group that received self-controlled concurrent feedback indeed reached the highest level of performance. Also, with practice, learners gradually decreased the number of feedback requests. This spontaneous strategy has been argued to prevent feedback dependence (cf., Salmoni, Schmidt, & Walter, 1984).

The aims of our study are (1) to test whether self-controlled concurrent feedback helps learners to more quickly converge on the information required to control the approach phase, and (2) to obtain an indication of the information that learners come to use after a short practice. Three groups of participants practiced the approach phase in a flight simulator. One group, the self-controlled group, was allowed to request concurrent feedback in the form of a PAPI. If they pushed a button, a PAPI indicated the current glide slope during two seconds. A second group, the yoked group, received concurrent feedback in the form of a PAPI following an imposed schedule. A control group did not receive concurrent feedback. Transfer tests were used to study the information that the different groups used after practice. We reasoned that the use of a particular type of information should be evidenced by a deterioration of performance in a transfer test in which that information is manipulated or not presented.

Method

Participants

Fifteen novice pilots (mean age = 27, SD = 4.11) participated in the experiment. All of them had normal or corrected-to-normal vision. They were divided into three experimental groups of equal size (n=5). Participants had no prior flight experience

and they were not informed about the purpose of the study. Informed consent was obtained prior to testing.

Task

Participants were asked to land the virtual aircraft (a Cessna 172) trying to follow the correct glide-slope area as accurately as possible. No on-board information displays were used, meaning that the control of the aircraft was purely visual. Participants were placed in conditions that were as similar as possible to real approach situations. At the beginning of each trial, the aircraft was located at a distance of 2700 m (1.46 Nm) from the intended landing point and at a starting altitude randomly chosen from 15 equidistant values between 101 and 131 m (331 and 430 ft). The aircraft flew on a straight line at a speed of 82 knots (42.18 m/s). As a result, the aircraft always started below the glide-slope area. The trial duration was about 50 s. The trials started with countdown of 3 seconds during which the autopilot was enabled. For the rest of the trial the participants controlled the altitude of the aircraft by pushing the joystick forwards or backwards. The lateral position of the aircraft remained aligned with the center of the runway throughout the trials. Trials ended 500 m before the landing point.

Apparatus

The set-up (Figure 4.2) consisted of an aviation-game joystick (Saitek AV8R), a 2.3-m high by 3-m wide projection screen, a Barco-Projector, and a PC (Dell Precision 380). Participants were seated at a distance of 1.2 m from the screen, which hence had an angular size of 87° (vertically) by 102° (horizontally). The data from the joystick were sampled with a frequency of 100 Hz. From this data, the PC calculated the updated position and the dynamics of aircraft in the virtual environment. The modified visual scene was projected on the screen with a delay of less than 50 ms. According to experimenters and participants this delay was not noticeable. The visual scene was changed at a rate of 60 frames/s.

The dynamics of the aircraft were simulated using the JSBSim open-source flight-dynamics model (Berndt, 2004). This model computes flight characteristics from the combination of the forces of nature and the forces and moments applied through the control mechanisms. The graphical environment (e.g., runway, ground surface, cockpit; see Figure 4.3) was produced with I.C.E. (Imagine, Create, Experiment), a software package developed at the Institute of Movement Sciences, Marseille (cf., Bastin, Craig, & Montagne, 2006 ; Craig, Berton, Rao, Fernandez, & Bootsma, 2006). We used a simple runway with a centerline and an aiming point. The landing point

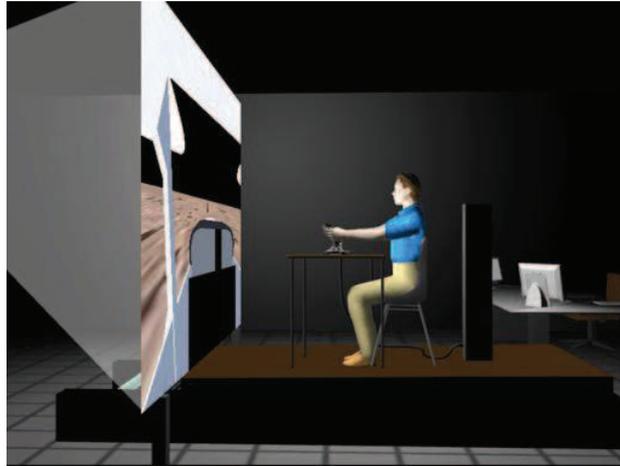


FIGURE 4.2 – Apparatus used in the experiment : a joystick, a projection system, and a control station that generates the visual scene.

was shown by two white rectangles, one on each side of the runways centerline, placed 300 m from the beginning of the runway. The runway was 1200 m long and 30 m wide. With a length-over-width ratio of 40 this is a standard runway for novice pilots.

Experimental Groups and Feedback Conditions

There were three experimental groups : self-controlled, yoked, and control. The self-controlled group received concurrent feedback using a self-controlled feedback schedule (cf., Chiviakowsky & Wulf, 2002 ; Huet et al., 2009a). Participants in this group could request concurrent feedback by pressing a trigger located on the front of the joystick. When a participant pressed the trigger the concurrent feedback appeared for two seconds and then disappeared automatically. Participants could ask for concurrent feedback as often as they wished and they could also decide not to ask for feedback. We recorded how many times and when the feedback was requested. The concurrent feedback was provided in the form of Precision Approach Path Indicators (PAPI), located near the aiming point on the left hand side of the runway (as seen from the approaching aircraft).

The yoked group followed an imposed concurrent feedback schedule. We randomly associated a participant in the self-controlled group to each participant in the yoked group. Each yoked-group participant received the feedback schedule re-

corded for his or her associate from the self-controlled group. Participants in the control group did not receive concurrent feedback. Terminal feedback was given in each group ; after each practice trial, this feedback showed the aircrafts trajectory on that trial together with the glide-slope area.

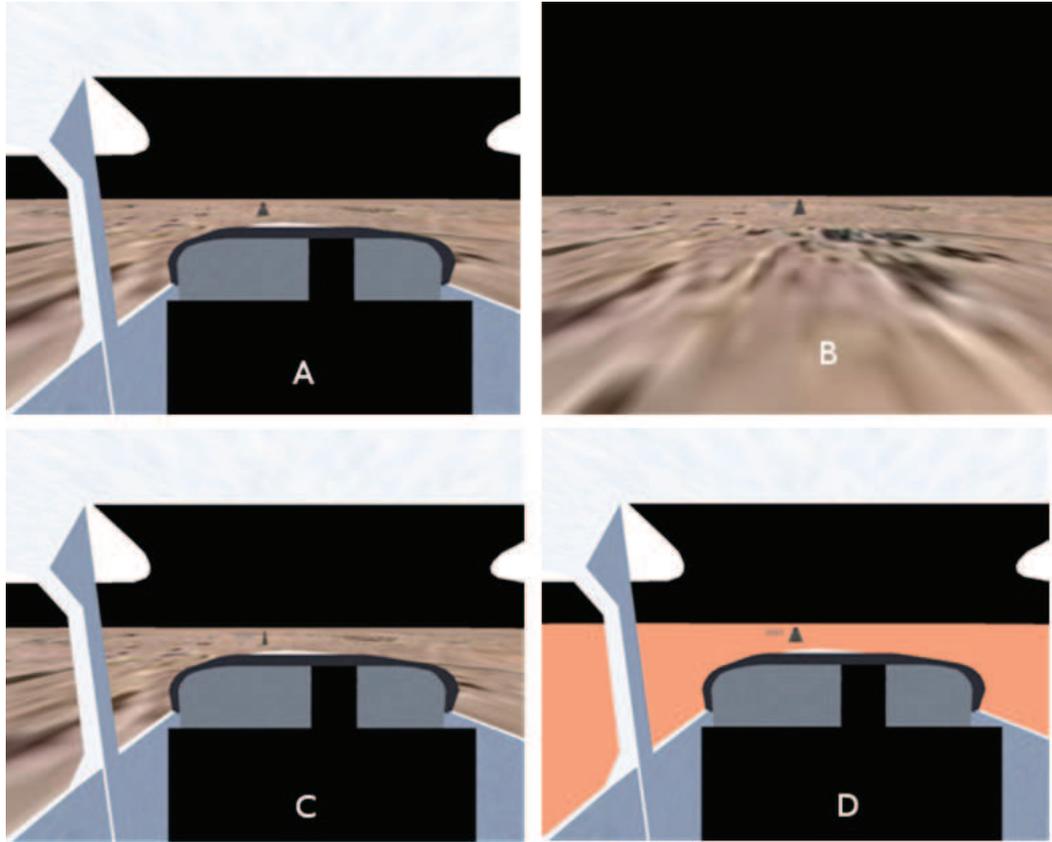


FIGURE 4.3 – Panel A shows the visual scene as used in the pretest, acquisition phase, and retention test. The other panels show the visual scene in the cockpit transfer (B), ratio transfer (C), and texture transfer (D).

Procedure

The experiment consisted of a calibration period, a pretest, an acquisition phase, a retention test, and three transfer tests. The calibration period consisted of 15 trials during which the participant aimed to fly through 20 rings. The purpose of this exercise was to familiarize the participant with the characteristics of the simulator. Then,

before the pretest, instructions concerning the experimental task were given and a video of a typical approach was shown to ensure that the participant understood the task. This video might also have helped participants to recognize the correct glide-slope area. The pretest consisted of 15 successive approaches without concurrent feedback and without terminal feedback Figure 4.3.A. The acquisition phase consisted of three blocks of 15 trials per day, during a four-day period, resulting in a total of 180 trials. The experimental groups differed in the concurrent feedback that they received in this phase, but all participants received the same terminal feedback. An additional block of 5 trials without concurrent feedback and without terminal feedback was performed at the end of each daily session.

Finally, a 15-trial retention test and three 5-trial transfer tests without feedback were run the day after the last day of acquisition. The retention test was identical to the pretest. The order of the transfer tests was counterbalanced among participants. Only 5 trials were used in the transfer tests to prevent adaptation to the test conditions. The transfer tests were identical to the pretest and retention test with the following exceptions. In the first transfer test, the cockpit was not shown in the visible scene (Figure 4.3.B). In the second transfer test, we used a runway with a width of 13.5 instead of 30 m (Figure 4.3.C). The resulting length-over-width ratio of 89 approximates the ratio of the narrowest runways typically encountered by pilots. In the third transfer test, we removed the ground texture : all landmarks were replaced by a uniform ground color (Figure 4.3.D).

Dependant Variables

We used data obtained between 2500 and 500 m before the landing point. The variable time flown within the glide-slope area indicates the accuracy of performance. This measure was expressed as a percentage (i.e., [time flown within the glide-slope area / total time of the trials] * 100). We also calculated the vertical distance between the aircrafts position and the bisecting line of the glide-slope area (2.8°). This variable, expressed in meters, is called the altitude deviation (cf., Gibb et al., 2008). In the majority of our analyses we considered the absolute value of the altitude deviation.

The self-controlled feedback data were analyzed through the frequency of requests and the moment of requests. The frequency of the requests (i.e., the total number of requests per day) was calculated for each day of the acquisition phase and for each participant in the self-controlled group, permitting a view on the evolution of the feedback requests over days of practice. To analyze the moments of

the requests, the acquisition trials were divided in intervals of 100 m (from 2500 to 500 m before the landing point). The number of requests in each of these intervals was determined, permitting a view on the within-trial evolution of the number of requests.

Results

This section concerns (1) the percentage of time that participants flew within the glide-slope area, (2) the altitude deviations, (3) the feedback requests, and (4) the transfer tests.

Percentage of Time in Glide-Slope Cone

Figure 4.4 shows the average percentage of time flown within the glide-slope area for the different experimental groups in the pretest, acquisition blocks, and retention test.

Pretest. As expected, a one-way ANOVA on the percentage of time within the area did not reveal a significant effect of experimental group ($F(2, 12) = 3.55, p > .05$).

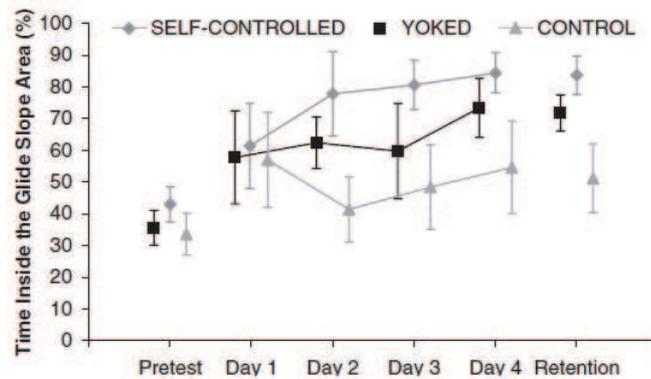


FIGURE 4.4 – Time flown within the glide-slope area for each experimental group in the pretest, Days 1 to 4 of the acquisition phase, and the retention test. The data presented for the acquisition phase concern the additional blocks without feedback.

Acquisition phase. We first address the additional daily blocks of 5 trials without concurrent or terminal feedback (Days 1 to 4 in Figure 4.4). A two-way ANOVA with Day as within-subjects factor and Group as between-subjects factor was performed with the percentage of time within the area as dependent measure. The analysis revealed significant effects for Day ($F(3, 36) = 4.27, p < .05, \eta_p^2 = 0.26$), for Group ($F(2, 12) = 11.29, p < .05, \eta_p^2 = 0.65$), and for the interaction Day x Group ($F(6, 36) = 2.89, p < .05, \eta_p^2 = 0.32$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) indicated that the performance increased significantly only for the self-controlled group; for this group, significant differences were observed between Day 1 and Day 3 and between Day 1 and Day 4 ($p < .05$).

Group as between-subjects factor was performed on the percentage of time within the area. This analysis revealed significant effects of Day ($F(3, 36) = 14.99, p < .05, \eta_p^2 = 0.55$) and Group ($F(2, 12) = 14.46, p < .05, \eta_p^2 = 0.7$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) performed on the Group effect indicated that the percentage of time that participants flew within the glide-slope area was higher for the self-controlled and yoked groups than for the control group ($p < .05$). The difference between the self-controlled and yoked groups was marginally significant.

Retention test. A two-way ANOVA with Group (self-controlled, yoked, and control) as between-subjects factor and Test Phase (pretest, retention test) as within-subjects factor was performed, again with percentage of time within the glide-slope area as dependent measure. Significant effects were observed for Test Phase ($F(1, 12) = 257.1, p < .05, \eta_p^2 = 0.95$), for Group ($F(2, 12) = 14.98, p < .05, \eta_p^2 = 0.71$), and for the interaction Test Phase x Group ($F(2, 12) = 12.90, p < .05, \eta_p^2 = 0.68$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed an increase in performance from pretest to retention test for all three groups ($p < .05$). In the retention test, the self-controlled group performed better than the yoked group and the control group ($p < .05$). The difference between the yoked and control groups was also significant ($p < .05$).

Altitude Deviation

Pretest. The averaged absolute altitude deviations are presented in Figure 4.5. A one-way ANOVA on these altitude deviations did not show a significant effect of Group in the pretest ($F(2, 12) = 1.22, p > .05$). It is worth noting that the (non significant) higher value in altitude deviation exhibited by the control group reflects the difficulties encountered by one of the participants to perform the task.

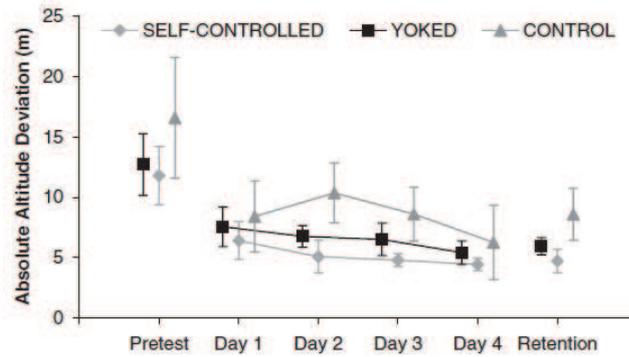


FIGURE 4.5 – Absolute altitude deviation for each experimental group in the different phases of the experiment (pretest, acquisition phase, and retention test). The data presented for the acquisition phase concern the additional blocks without feedback

Acquisition phase. A two-way ANOVA with Day as within-subjects factor and Group as between-subjects factor was performed with absolute altitude deviation as dependent measure, using the data from the additional daily blocks of 5 trials. The analysis revealed significant effects for Day ($F(3, 36) = 6.00, p < .05, \eta_p^2 = 0.33$), for Group ($F(2, 12) = 7.08, p < .05, \eta_p^2 = 0.54$), and for the interaction Day x Group ($F(6, 36) = 2.40, p < .05, \eta_p^2 = 0.28$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) indicated a significant decrease in altitude deviation for the self-controlled and yoked groups between the first and fourth day of practice ($p < .05$). No significant decrease was observed for the control group.

Retention test. A two-way ANOVA with Group (self-controlled, yoked, and control) as between-subjects factor and Test Phase (pretest, retention test) as within-subjects factor was performed with absolute altitude deviation as dependent measure. Only the main effect of Test Phase was significant ($F(1, 12) = 377.01, p < .05, \eta_p^2 = 0.74$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed a decrease in altitude deviation from pretest to retention test for all three groups ($p < .05$).

Figure 4.6 presents the time-evolution of the altitude deviations. As a consequence of the design of the experiment, participants entered the glide-slope area from below (i.e., with negative altitude deviations). In the pretest (left panels), participants in all three groups tended to fly above the glide-slope area in the latter parts of the approach. For the control group this average overshoot was still present in the retention test (right panels). On the other hand, in the retention test this overshoot was very small or nonexistent for the yoked and self-controlled groups.

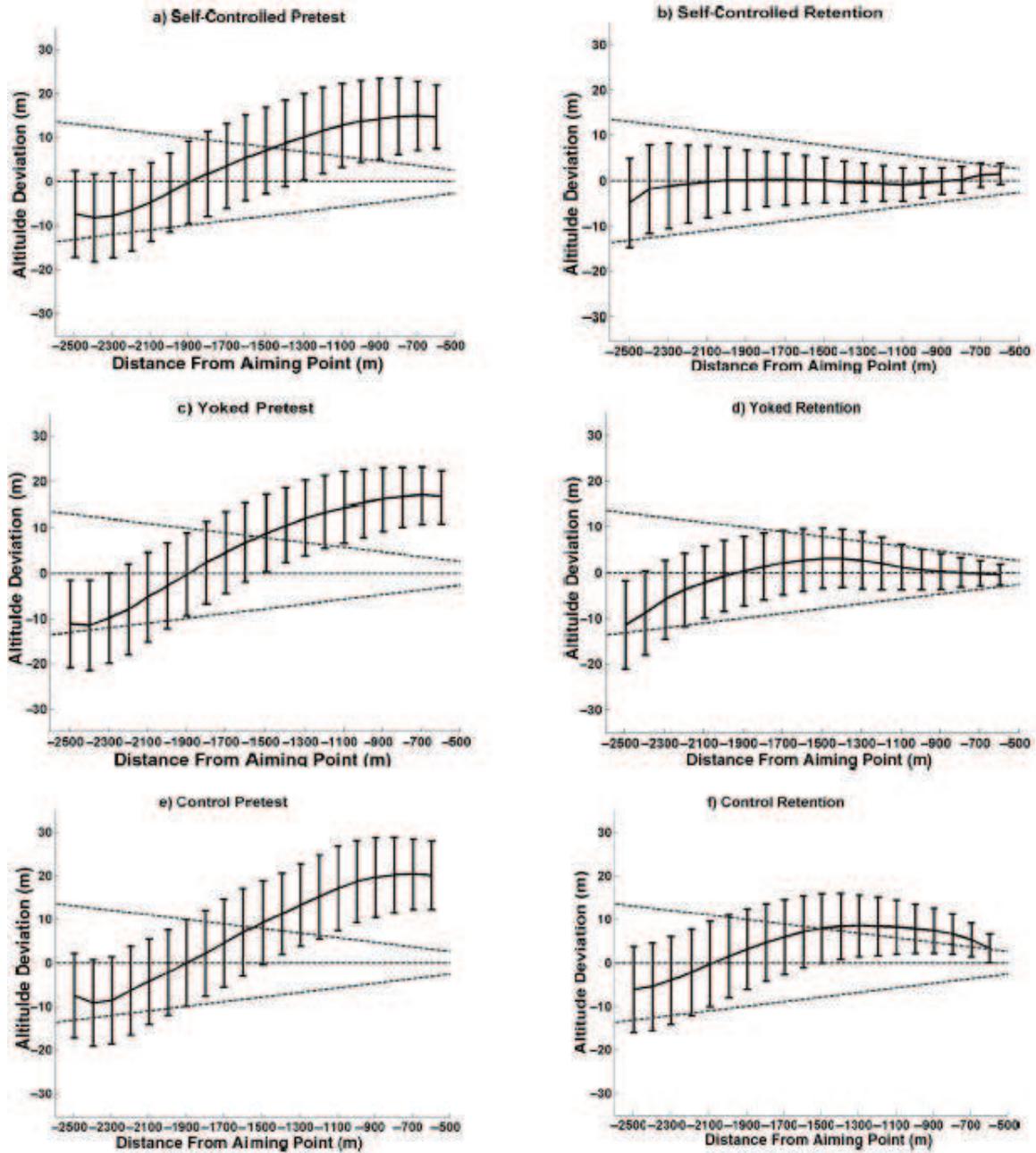


FIGURE 4.6 – Altitude deviations for each experimental group in pretest and retention test. The area between the dotted lines represents the glide-slope area

Use of Feedback

Frequency of feedback requests. On average, participants in the self-controlled group asked for feedback about 5 times per trial. An ANOVA on the number of requests did not reveal a significant effect of Day ($F(3, 12) = 0.76, p > .05$); hence, we did not observe a significant reduction in the amount of requests. As can be seen in Figure 4.7, participants showed a high level of variability in the use of the feedback. For instance, Participant 2 (squares) asked more frequently for the feedback at the beginning of the experiment than at the end. Participant 5 (cross symbols) increased the number of requests from Day 1 to Day 4. Finally, Participant 3 (triangles) showed less change in the frequency of requests. Despite this variability, all these participants reached a high level of performance.

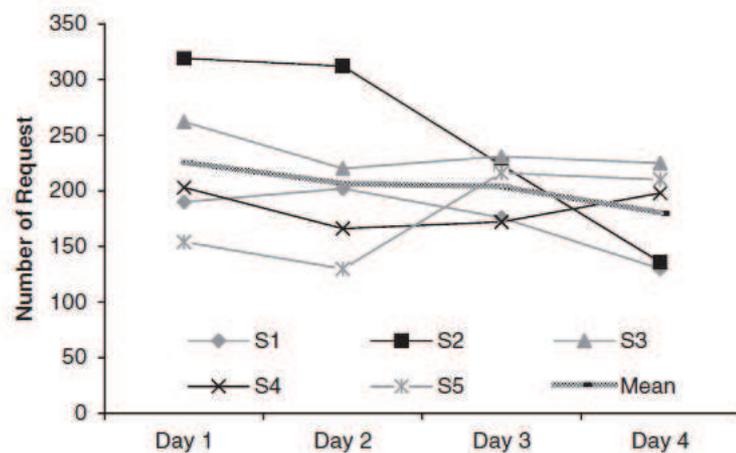


FIGURE 4.7 – Frequency of feedback requests during the acquisition phase for each participant in the self-controlled group (S1 to S5), together with the frequency as averaged over these participants.

Moments of feedback requests. In contrast to the frequency of requests, participants did not seem to differ and change in the moments at which they asked for the feedback. Figure 4.8 shows that the number of requests gradually increased during the approach ($R^2 = 0.67, p < .05$). This increase goes together with the reduction of the glide-slope area : the closer to the runway, the smaller the glide-slope area, and the higher the number of requests.

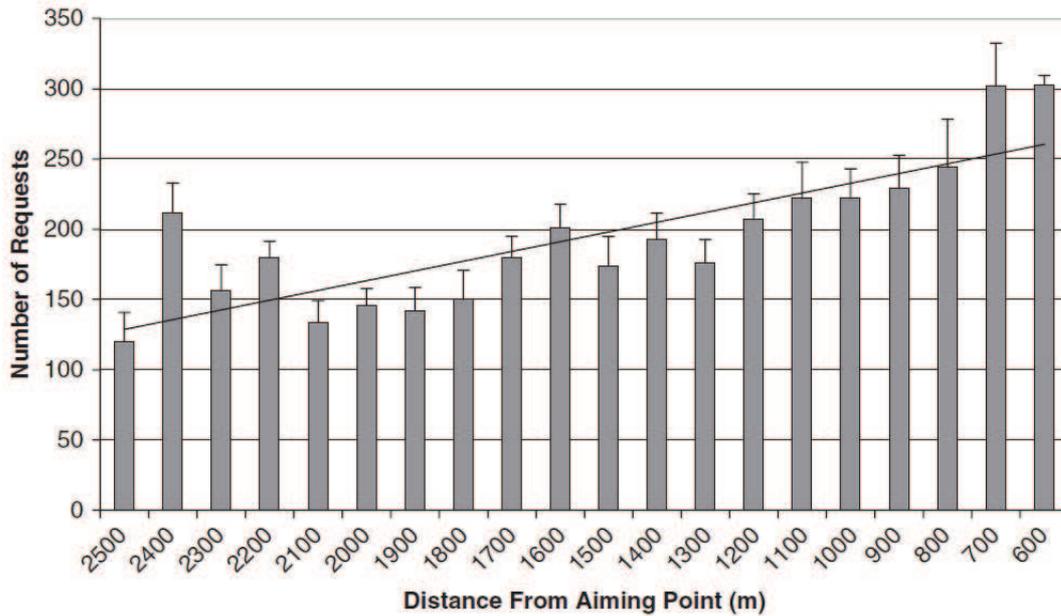


FIGURE 4.8 – . Distribution of feedback requests during the approach.

Transfer Tests

Percentage of time within glide-slope area. A two-way ANOVA with Group (self-controlled, yoked, control) as between-subjects factor and Test Phase (pretest, retention test, cockpit transfer, ratio transfer, texture transfer) as within-subjects factor was performed with percentage of time within the glide-slope area as dependent measure (see also Figure 4.9). The analysis revealed significant effects of Test Phase ($F(4, 48) = 15.51, p < .05, \eta_p^2 = 0.56$) and Group ($F(2, 12) = 5.13, p < .05, \eta_p^2 = 0.46$). The interaction Test Phase x Group was not significant ($F(8, 48) = 1.16, p > .05$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed that the percentage of time within the area was higher in the retention test than in any other test phase and that the percentage was higher in the ratio and texture transfer as compared to the pretest and the cockpit transfer ($p < .05$).

Altitude deviation. We performed a two-way ANOVA with Group (self-controlled, yoked, control) as between-subjects factor and Test Phase (pretest, retention test, cockpit transfer, ratio transfer, texture transfer) as within-subjects factor on the absolute altitude deviations. The only significant effect was the main effect of Test

Phase ($F(4, 48) = 13.20, p < .05, \eta_p^2 = 0.52$). A posteriori comparisons (Newman-Keuls) showed that the altitude deviations were lower in the retention test than in any other test phase and that the deviations were lower in the ratio and texture transfer than in the pretest and in the cockpit transfer ($p < .05$).

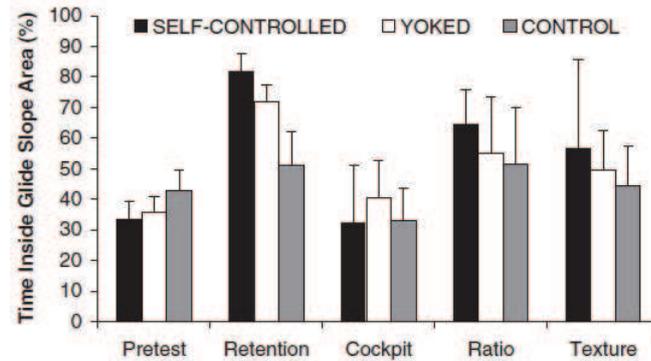


FIGURE 4.9 – Time flown within the glide-slope area as a function of experimental group (self-controlled, yoked, and control) and test phase (pretest, retention test, and transfer tests).

Individual differences. Figure 4.10 presents the percentage of time within the glide-slope area as a function of test phase for each individual and each experimental group. The figure illustrates that this measure differs more over the different transfer tests for the self-controlled group than for the yoked and control groups. Furthermore, manipulating the perceptual information appears to have different effects on the performance of different individuals, with the notable exception of the information related to the cockpit. Removing the cockpit from the visual scene gave rise to a decrease in the time spent within the cone for all participants. In contrast, manipulating the information related to the runway ratio and to the ground texture gave rise to very different (sometimes opposed) effects for different participants.

Discussion

The present experiment was designed to test whether self-controlled concurrent feedback helps learners to discover the more useful sources of information when approaching the runway during landing. A first group of individuals practiced the landing task with concurrent feedback available whenever they requested (the self-controlled group), a second group practiced the task with imposed rather than

self-controlled feedback (the yoked group), and a third group practiced without concurrent feedback (the control group). The highest level of performance (i.e., the highest percentage of time flown inside the glide-slope area) was achieved by the self-controlled group, followed by the yoked and control groups. This means that practice with self-controlled concurrent feedback is the most effective practice schedule for this task.

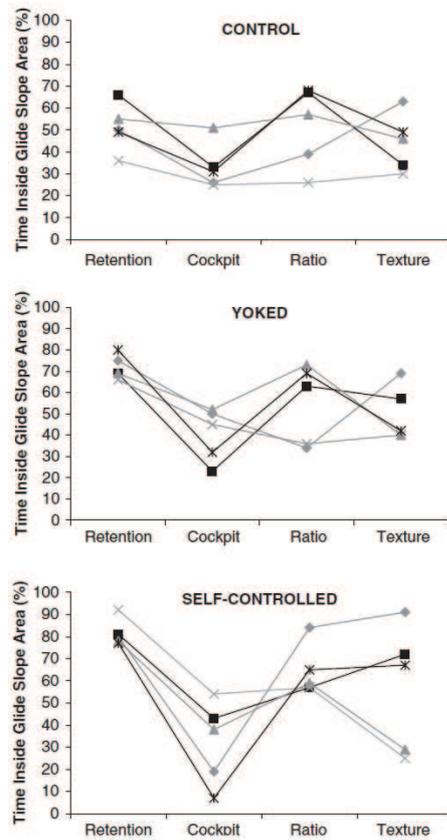


FIGURE 4.10 – Time flown within the glide-slope area, for each participant in each experimental group, in the retention test and in the transfers tests (cockpit, ratio, and texture).

test, the percentage of time spent in the glide-slope area was higher for the self-controlled group than for the other groups. Furthermore, the increase in perfor-

Our second purpose was to provide an indication about the information that learners come to use after a short practice. To achieve this, transfer tests were performed in which different sources of information were manipulated. The manipulations were found to have different effects for different individuals. Removing the cockpit, however, was shown to have a systematic and detrimental effect on the performance of the majority of the participants. These results are further discussed in the following sections.

Self-Controlled Feedback Procedures and the Education of Attention

The self-controlled procedure tested in this experiment is based on the hypothesis that providing learners the possibility to access the current relation to the environment (i.e., the current position of the plane in relation to the glide-slope area) allows the learners to more easily identify the informational variables that specify that relation (e.g., H-angle, form ratio). Said differently, the self-controlled procedure might help learners to come to rely on the perceptual regularities that characterize successful landing. Our results confirm this hypothesis because, in the retention

mance exhibited by the self-controlled group was due not only to the availability of the concurrent feedback, but also to the possibility to receive the concurrent feedback whenever it was requested. The benefits of self-controlled terminal feedback have previously been described by Janelle et al. (1997), Wulf and Toole (1999), and Chiviawski and Wulf (2002, 2005), among others. Our results are consistent with these previous studies. In addition, our results reveal the benefits of feedback that is both concurrent and self-controlled, and they reveal the benefits of such feedback for a complex and practically relevant perceptual-motor task.

Types of Feedback Requests ?

Our study also revealed an unexpected result : the number of feedback requests did not decrease during the acquisition phase. This is surprising because previous studies on self-controlled procedures had shown that, with practice, participants come to ask for feedback less frequently (e.g., Janelle1997; Huet et al., 2009a). Such a fading strategy has been hypothesized to prevent the so-called guidance effect (Salmoni et al., 1984). That is, by spontaneously applying a fading schedule, participants avoid a feedback dependency that might otherwise have caused less accurate performance in retention tests without feedback. Although participants in the self-controlled group did not exhibit a fading strategy, they still showed high levels of performance in the retention test. More precisely, one participant in the self-controlled group showed a fading schedule whereas the other four participants did not, even though they all reached a high level of performance.

Let us consider a tentative explanation for the finding that a lack of a spontaneous fading did not prevent these individuals from learning the task. On the first day of practice 63% of the requests occurred while the virtual aircraft was located in the correct glide-slope area. This percentage increased to 90% during the last day of practice. Based on these results one might hypothesize that the functional role of the requests changed with practice. That is, the initial requests might have been used to discover the relation between the relative location of the aircraft and the informational variables, whereas the later requests may have had a more confirmatory role, allowing the learners to make sure that the plane was located in the correct area. Relatedly, Chiviawski and Wulf (2002) showed that learners ask for terminal feedback mostly after successful trials. In sum, we hypothesize that a feedback dependency might have been avoided in our experiment by a gradual change in the functional role of the feedback requests rather than by a spontaneous fading strategy.

The Transfer Tests and the Information Used After Practice

Transfer tests were included in the experiment to obtain an indication about the information that the participants came to use after practice. In the transfer tests, specific sources of information were manipulated or removed. The results from the transfer tests allow a number of comments. First, the self-controlled group seemed to be more affected by the transfer tests than the other groups. This indicates that the self-controlled procedure allowed learners to come to attend to the more useful informational variables; as a consequence, manipulating that information gave rise to a substantial decrease in performance. Furthermore, not presenting the cockpit has a larger detrimental effect than modifying the size ratio of the runway or removing the ground texture. Given that the relative H-angle is defined with regard to the visible cockpit (Galanis et al., 1998; Lintern & Liu, 1991), observers who rely on this variable in a retention test might be predicted to perform less accurately in a transfer test that does not include a visible cockpit. Hence, overall, the results of the transfer tests are consistent with the use of the relative H-angle.

The results of the transfer tests should be interpreted with caution, however, because the different individuals were differently affected by the manipulations. Whereas some of them showed a decrease in performance only when the cockpit was removed, others were more affected by the texture transfer. This illustrates that the previously identified informational variables (e.g., form ratio, relative H-angle, and texture gradients) provide different degrees of freedom to perform the task. Different individuals apparently rely on different perceptual regularities. As a first implication, this finding indicates that it might be useful to apply individually-tailored learning methods that adapt the conditions of practice according to the variables used by particular individuals.

Concluding Remarks

Taken together, our results reveal that self-controlled concurrent feedback is indeed beneficial for this task, and they provide tentative support for the claim that the relative H-angle is used after practice. However, it would be worthwhile to further establish the later finding, among other reasons because of the observed individual differences. It would be especially useful to perform experiments in which the implied variables are biased and experiments with participants with different levels of expertise (e.g., expert pilots, student pilots, and novices). The observed individual differences also indicate that larger pools of participants are needed in order to discover trends in variable use in the different groups. To conclude we briefly indicate possible applications of knowledge about feedback schedules and variable use.

Results concerning feedback schedules might be relevant to pilot instructors. Current training methods are based on detailed procedures in which the more extended landing phase is split up in subtasks that together define a circuit (upwind leg, crosswind leg, downwind leg, base leg, final approach, and landing flare). Each subtask is characterized by recommendations relative to altitude, among other things, with the result that in the end the student pilot is able to perform the complete task. The method proposed in this study is not designed to replace existing methods but rather to complement them. If pilots control the approach phase on the basis of optimal informational variables, then they might be more flexible in the sense that they might be more able to compensate (cumulative) errors produced during the earlier phases of the landing circuit.

Knowledge about variable use has important implications too. For instance, if expert pilots often use the form ratio, then the visibility of the runway outline is crucial, which implies that one should consider ways to enhance this visibility. On the other hand, if pilots rely on relative H-angles, then the visibility of the aiming point and the edge of the cockpit are more important. In addition, if pilots use relative H-angles, then changes in this variable predict changes in approach trajectories. Relative H-angles can be changed (or biased) as a result of changes in the eye-position of the pilot in the cockpit, or as a result of the use of different aircraft. The occurrence of such changes together with reliance on this variable hence predicts the occurrence of accidents much like black hole accidents, especially if no other information is available to overrule the control based on the biased angles. In short, knowledge about variable use might help us to understand accidents, and perhaps to avoid them.

CHAPITRE 5

Variabilité de la pratique, apprentissage et éducation de
l'attention

The Education of Attention as Explanation of Variability-of-Practice Effects : Learning the Final Approach Phase in a Flight Simulator¹

Abstract

The present study reports two experiments in which a total of 20 participants without prior flight experience practiced the final approach phase in a fixed-base simulator. All participants received self-controlled concurrent feedback during 180 practice trials. Experiment 1 shows that participants learn more quickly under variable practice conditions than under constant practice conditions. This finding is attributed to the education of attention to the more useful informational variables : Variability of practice reduces the usefulness of initially used informational variables, which leads to a quicker change in variable use, and hence to a larger improvement in performance. In the practice phase of Experiment 2 variability was selectively applied to some experimental factors but not to others. Participants tended to converge toward the variables that were useful in the specific conditions that they encountered during practice. This indicates that an explanation for variability-of-practice effects in terms of the education of attention is a useful alternative to traditional explanations based on the notion of generalized motor program and to explanations based on the notions of noise and local minima.

1. Huet, M., Jacobs, D. M., Camachon, C., Missenard, O., Gray, R., Montagne, G. (soumis). The Education of Attention as Explanation of Variability-of-Practice Effects : Learning the Final Approach Phase in a Flight Simulator. *Journal of Experimental Psychology : Applied*.

Introduction

Many actions require high levels of perceptual-motor skill. An example of an action that requires a high level of skill is landing an aircraft. The visually controlled landing is the most challenging phase of normal flights. During the landing phase, a pilot performs three subtasks : first, the base to final turn consists of aligning the aircraft with the runway (Beal & Loomis, 1997) ; second, in the final approach phase, the pilot gradually decreases speed and altitude through a stable descent (Lintern, 2000) ; finally, just before ground contact, the aircraft is tilted slightly nose-upwards, a maneuver called the landing flare (Palmisano, Favelle, & Sachtler, 2008). In this study we focus on the final approach phase.

In the final approach phase the pilot aims to fly within the glide slope area. This area consists of a virtual cone whose origin is located at the aiming point on the runway. The cone is bounded by a lower limit, generally an approach angle of 2.8° , and an upper limit, generally an approach angle of 3.2° . If the trajectory of the aircraft is too low, collisions may occur with obstacles such as buildings, trees, or antenna towers. Too high trajectories lead to the risk of overrunning the end of the runway and the risk of hard landings that may damage the structure of the aircraft (Benbassat & Abramson, 2002). The final approach phase can be especially difficult for novice pilots when they land an aircraft at an airport they have not experienced previously. Several visual cues (runway shape, landmarks on the ground) are different at different airports, sometimes leading pilots to misjudge altitude or approach angle (Mertens, 1981; Mertens & Lewis, 1982). Facilitating the learning of this phase is therefore an important challenge.

To address this challenge we consider the variability of practice hypothesis (Schmidt, 1975). The variability of practice hypothesis holds that performance improves more with variable practice than with constant practice. Many studies have reported or reviewed empirical evidence related to the hypothesis (e.g., Buekers, 1995 ; Shea & Wulf, 2005 ; van Rossum, 1990 ; see also Schöllhorn, 2000, Schöllhorn et al., 2006, and Shea & Morgan, 1979, for related work). Buekers, for example, compared the performance of two groups that practiced basketball shots. The first group performed shots from different distances (variable practice), whereas the second group performed shots from a single distance (constant practice). The two groups performed a transfer test from a new distance. The constant group performed better than the variable group during the acquisition phase. In contrast, the variable group performed better than the constant group in the transfer test. This pattern of results is typical of the majority of studies in this area.

The empirical work concerning variability of practice originated as a test of Schmidt's (1975) schema theory, which provides an explanation of the beneficial effect of variability. The key concept of this theory is the Generalized Motor Program (GMP). A single GMP is hypothesized to control a class of actions with a similar overall structure (writing one's signature, performing a basketball shot). To apply a GMP to the control of a particular action in the class, several parameters have to be set that control more detailed aspects of the action (e.g., speed, amplitude). In this theoretical framework, learning consists of acquiring knowledge about the relation between parameters of the GMP and movement outcomes. Variable practice is hypothesized to be effective because it allows the learner to sample a useful range of parameter-set/movement-outcome pairs. Constant practice, in contrast, is hypothesized to be less effective because it repeatedly provides the learner with the same parameter-set/movement-outcome pair, or with similar ones, which does not help the learner as much in discovering the relation between parameters and movement outcomes.

The present study is motivated by an alternative explanation of the beneficial effects of practice variability. Ecological theorists claim that perceptual-motor learning at least partly involves a change in the informational basis of an action : With practice, learners come to rely on more useful informational variables. This process, referred to as the education of attention (Michaels & Carello, 1981), proceeds more slowly if the initially used informational variables are highly useful during practice but are ineffective when performing the action under more variable conditions, and more fast if initially used informational variables are less useful during practice (Jacobs, Runeson, & Michaels, 2001 ; cf., Fajen & Devaney, 2006). This means that in order to design optimal practice conditions one should reduce the usefulness of initially used informational variables, at least if these are not among the more useful ones. Our hypothesis is that practice conditions with high variability are effective to the extent that the initially used informational variables are less useful in such practice conditions. To illustrate this hypothesis and apply it to the case of landing we first need to discuss the informational variables that are available during landing.

A first candidate variable is the visual angle between the horizon and the aiming point, as seen from the aircraft. Lintern and Liu (1991) reported experimental results that are consistent with the use of this variable, which they refer to as absolute H angle (cf., Langewiesche, 1944). Under normal circumstances the absolute H angle specifies approach angle : It remains constant when the approach angle re-

mains constant and it changes when the approach angle changes². This specifying relation is independent of, say, texture density, runway width, and the pilot's eye position in the cockpit; the absolute H angle is not affected by variability in such factors. Galanis, Jennings, and Beckett (1998) also described the relative H angle, which refers to the visual angle between the aiming point and an arbitrary point on the aircraft. For approaches with a given pitch angle, the relative H angle specifies approach angle if the eye position of the pilot stays constant with respect to the cockpit. Variability in eye position, however, affects the relative H angle, and thereby breaks the specificity between the relative H angle and approach angle.

Another type of information is the form ratio of the runway, defined as the optical length of the runway divided by the optical width. A set of experiments conducted by Mertens (1981) and Mertens and Lewis (1982) indicate that the form ratio is indeed relevant to the performance of pilots in the approach phase. This variable specifies approach angle in situations in which all used runways have the same physical length-over-width ratio. This is the case, for instance, if a pilot always lands on the same runway. The form ratio is affected by trial-to-trial variability in the physical shape of the runway: The use of this variable predicts pilots to fly lower in approaches to narrow runways as compared to wide runways. The use of the form ratio can hence lead to dangerous situations especially for pilots who occasionally land on narrow runways while they are used to landing, or trained to land, on wider runways.

Also of interest is the visible texture of the ground surface. Texture density has been shown to affect the accuracy of visual approaches (Lintern & Walker, 1991; Lintern, 2000). Approaches are less accurate if performed in scenes with less texture (cf., Lintern & Liu, 1991). Numerous higher-order and lower-order variables have been identified in relation to the visible texture. Among these variables are gradients and perspective angles (Flach & Warren, 1995; Flach, Warren, Garness, Kelly, & Stanard, 1997; Lintern, 2000) and higher-order properties of the optic flow field (Gibson, Olum, & Rosenblatt, 1955). The use of texture-related information by pilots under normal circumstances is also evidenced by black hole accidents, which are accidents that occur in the absence of a distinguishable ground texture (Gibb, 2007; Gibb, Schvaneveldt, & Gray, 2008).

The capacity to detect and correctly use sufficiently useful sources of information is of crucial importance for visual landings. Given that novices do not always

2. The approach angle is defined as the angle between the horizontal and the imaginary line from the aircraft to the aiming point

use optimal informational variables, this skill has to be learned. Huet, Jacobs, Camachon, Goulon, and Montagne (2009b) reported that participants who performed the approach phase in a flight simulator improved substantially after 180 practice trials. This improvement was attributed to changes in variable use. In that study we were interested in the type of feedback that leads to the quickest improvement in performance. It was shown that concurrent feedback provided with a self-controlled schedule (i.e., with learners controlling when they receive the feedback; cf., Huet, Camachon, Fernandez, Jacobs, & Montagne, 2009a) is more beneficial than imposed concurrent feedback which, in turn, is more beneficial than practice without concurrent feedback.

In the present study we use the type of feedback that was found to be most beneficial by Huet et al. (2009b) -self-controlled concurrent feedback and address the effects of practice variability. In Experiment 1, two groups of participants practiced the landing task on four consecutive days, with a simulator, under variable or constant practice conditions. In the practice phases of Experiment 2 one of three experimental factors was held constant, and variability was applied to the remaining two factors.

Experiment 1

In this experiment we applied the variability of practice methodology to the final approach phase in landing. We contrasted performance of constant and variable practice groups. In variable practice, trial-to-trial variability was applied to three factors : texture density, runway width, and the eye height of the participant in the cockpit. We hypothesized that the variable group would outperform the constant group in a transfer test. This would be in agreement with previous research concerning variability of practice.

Method

Participants

Ten students and faculty members (mean age = 27.5, $SD = 3.17$) participated in the experiment. All of them had normal or corrected-to-normal vision. They were randomly assigned to one of the two groups. Participants had no prior flight experience and they were not informed about the purpose of the study.

Task

We used the same simulated flight task as in Huet et al. (2009b). Participants approached the runway in a Cessna 172, trying to stay within the glide slope area. The control of the aircraft was visual (i.e., without on-board information displays). At the beginning of each trial the aircraft was located at a distance of 2700 m (1.46 Nm) from the landing point, at an altitude randomly chosen from 15 equidistant values between 107 and 126 m (353 and 416 ft). This meant that the aircraft always started below the glide slope area. The initial speed was 42.18 m/s (82 knots). The trials started with a countdown of 3 seconds during which the autopilot was enabled. For the rest of the trial participants controlled the altitude of the aircraft by pushing a joystick forwards or backwards. The lateral position of the aircraft remained aligned with the center of the runway. Trials ended 500 m before the landing point. The trial duration was about 50 s.

Concurrent and terminal feedback was provided to all participants (cf., Huet et al., 2009b). The concurrent feedback was in the form of a Precision Approach Path Indicator (PAPI). The PAPI was located at the left side of the runway, as seen from the aircraft, close to the aiming point. A PAPI consists of four lights whose colors (red or white) indicate the aircraft's Current Glide Slope (CGS). Two red and two white lights indicate that the aircraft is located within the glide slope area ($2.8^\circ < \text{CGS} < 3.2^\circ$), three or four red lights indicate that the aircraft is below this area ($2.5^\circ < \text{CGS} < 2.8^\circ$ or $\text{CGS} < 2.5^\circ$, respectively), and three or four white lights indicate that the aircraft is above the area ($3.2^\circ < \text{CGS} < 3.5^\circ$ or $3.5^\circ < \text{CGS}$). The concurrent feedback was provided in a self-controlled way (Chiviawosky & Wulf, 2002; Huet et al., 2009a). When a participant pressed a button on the joystick a PAPI appeared for two seconds and then disappeared automatically. In addition, terminal feedback was given after each practice trial. This feedback showed the aircraft's trajectory on the trial together with the glide slope area in a 2-D side view.

Apparatus

Figure 5.1 illustrates the set-up : an aviation-game joystick (Saitek AV8R), a large projection screen, a Barco-Projector, and a PC (Dell Precision 380). Participants sat at a distance of 1.2 m from the screen, which had an angular size of 102×87 degrees (horizontally \times vertically). The data from the joystick were sampled at a frequency of 100 Hz. The PC used these data to calculate the updated position of the aircraft in the virtual environment; the updated visual scene was projected on the screen with a delay of less than 50 ms. The visual scene was changed at a rate of 60 frames/s.

The flight kinematics of the aircraft in the virtual environment were computed using the JSBSim open-source flight-dynamics model (Berndt, 2004). The virtual runway, ground surface, and cockpit were produced with I.C.E. (Imagine, Create, Experiment), a software package developed at the Institute of Movement Sciences, Marseille (Bastin, Craig, & Montagne, 2006 ; Huet et al., 2009a). The runway was 1200 m long and 30 m wide, meaning that it had a length-over-width ratio of 40. The ground surface consisted of filled black circles with a diameter of 13 m on uniformly colored yellow round surface.

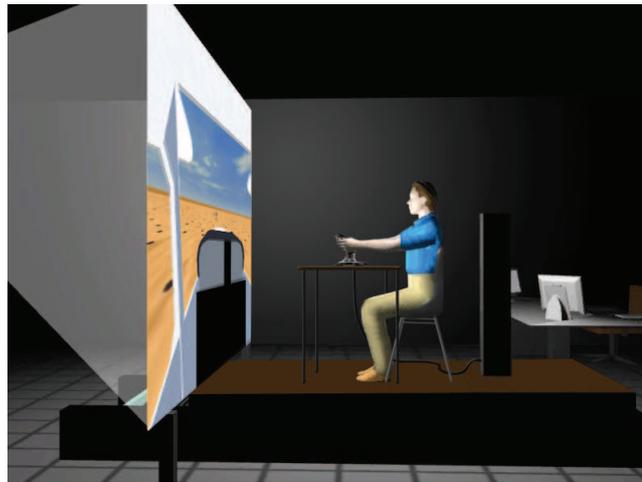


FIGURE 5.1 – Apparatus used in the experiments, including a joystick, a video projector, a large screen, and a control station.

Procedure

The experiment consisted of a calibration period, pretest, acquisition phase, retention test, and transfer test. The calibration period consisted of 15 trials during which the participant flew through large rings located at different altitudes. The rings had a diameter of 15 m and were located at altitudes between 190 and 280 m. This exercise familiarized participants with the flight simulator. Then, before the pretest, instructions about the experimental task were given and a video of a typical approach was shown. The video was shown to ensure that participants understood the task. The pretest consisted of 15 trials without concurrent feedback and without terminal feedback. The acquisition phase consisted of 180 trials : three blocks of 15 trials per day during a four-day period. An additional block of 5 trials without

Day 1	Day 2	Day 3	Day 4	Day 5
Calibration period	Practice block	Practice block	Practice block	Retention test
Pretest	Practice block	Practice block	Practice block	Transfert test (10 trials)
Practice block	Practice block	Practice block	Practice block	Transfert test ³ (10 trials)
Practice block	No-feedback block (5 trials)	No-feedback block (5 trials)	No-feedback block (5 trials)	
Practice block				
No-feedback block (5 trials)				

TABLE 5.1 – Experimental Phases in Experiments 1 and 2

concurrent feedback and without terminal feedback was performed at the end of each daily session. The day after the last day of acquisition a 15-trial retention test and a 10-trial transfer test without feedback were run. The retention test was identical to the pretest. Only 10 trials were used in the transfer tests to prevent adaptation to the test conditions. The phases of the experiments are summarized in Table 5.1.

Experimental Groups

There were two experimental groups : variable and constant. The 15-trial acquisition blocks were different for these groups. For the variable group, the simulated conditions were changed from trial to trial. The changes were applied on three factors : texture density, runway width, and eye height. Fifteen equidistant values were used for each experiment factor. The boundary values were 165 and 1005 points/km² for texture density, 19 and 57 m for runway width, and -5.25 and 5.5 cm for the pilot's eye height. The values for eye height are given relative to the pilot's usual eye

3. Used in Experiment 2; Experiment 1 included only a single transfer test. Moreover, all blocks consist of 15 trials, unless stated otherwise.

position, which is 32 cm above, 36 cm in front of, and 21 cm to the left of the center of mass of the aircraft. For the variable group one of the fifteen values of each factor was randomly assigned to each practice trial. For the constant group the values of the experimental factors were the same on each trial : 555 points/km² for texture density, 28.6 m for runway width, and 0 cm for eye position (i.e., the eye position was the pilot's usual one). The values of these factors that were used in the pretest, the additional 5-trial blocks in the acquisition phase, and the retention test were identical to the ones used for constant practice. The transfer test was performed with values of the experimental factors that were new for both groups : The pilot's eye height was fixed at 8 cm above its usual position, the runway had a width of 13 m (i.e., a length-over-width ratio of 92), and the texture density was 40 points/km².

Dependent Variables

We used data obtained between 2500 and 500 m before the landing point. The variable time flown within the glide slope area was calculated as the percentage of time that the virtual aircraft was located within the glide slope area with respect to the total time of the trials. We also calculated the vertical distance between the aircraft's position and the bisecting line of the glide slope area (3°). This variable is called the altitude deviation (Gibb et al., 2008). A positive altitude deviation indicates a flight trajectory above the bisector of the glide slope area and a negative altitude deviation indicates a trajectory below the bisector. The self-controlled feedback data were analyzed through the frequency of requests (i.e., the total number of requests per day). The frequency of the requests was calculated for each day of the acquisition phase and for each participant.

Results

This section addresses (1) the percentage of time in the glide slope area, (2) the altitude deviation, and (3) the frequency of the feedback requests.

Percentage of Time in Glide Slope Area

Figure 5.2 shows the average percentage of time flown within the glide slope area for the two experimental groups in the pretest, acquisition phase, retention test, and transfer test.

Pretest. A one-way ANOVA on the percentage of time within the area did not reveal a significant effect of experimental group, $F(1, 8) = 0.41$, $p > .05$.

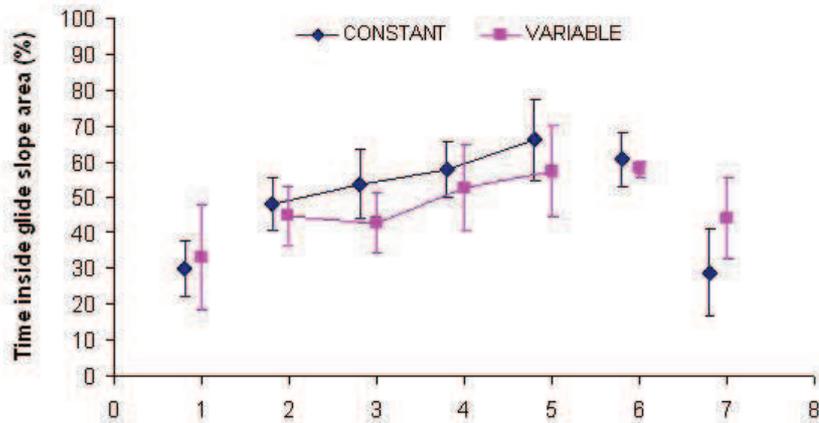


FIGURE 5.2 – Time flown within the glide slope area for constant and variable groups in the pretest, acquisition phase (Days 1 to 4), retention test, and transfer test of Experiment 1. The data presented for Days 1 to 4 concern the additional blocks without feedback.

Acquisition phase. A two-way ANOVA with Day (Days 1 to 4) as within-subjects factor and Group (constant, variable) as between-subjects factor was performed on the percentage of time within the area in the additional 5-trial acquisition blocks without feedback. The only significant effect was the effect of Day, $F(3, 24) = 4.68$, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.37$. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) indicated that performance increased for both groups : Significant differences were observed between Day 1 and Day 4 and between Day 2 and Day 4 ($p < .05$).

Retention test. A two-way ANOVA with Group (constant, variable) as between-subjects factor and Test Phase (pretest, retention test) as within-subjects factor was performed. A significant effect was observed for Test Phase, $F(1, 8) = 46.41$, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.85$. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed an increase in performance from pretest to retention test for both groups ($p < .05$).

Transfer test. A two-way ANOVA with Group (constant, variable) as between-subjects factor and Test Phase (retention test, transfer test) as within-subjects factor was performed with percentage of time within the glide slope area as dependent measure. The analysis revealed significant effects of Test Phase, $F(1, 8) = 38.67$, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.82$, and Test Phase x Group, $F(1, 8) = 5.76$, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.42$. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed a decrease in performance from

retention test to transfer test for both groups ($p < .05$). Furthermore, in the transfer test the variable group performed better than the constant group ($p < .05$).

Altitude Deviation

Figure 5.3 shows the averaged absolute altitude deviations for the two experimental groups. We performed the same analyses on altitude deviation as the previously reported ones on percentage of time within the glide slope area. These analyses produced similar results, including a main effect of Day (Days 1 to 4) during the acquisition phase, $F(3, 24) = 7.33$, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.47$; a main effect of Test Phase when comparing pretest and retention test, $F(1, 8) = 28.32$, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.78$; and main effect of Test Phase when comparing retention and transfer tests, $F(1, 8) = 8.93$, $p < .05$, $\eta_p^2 = 0.52$.

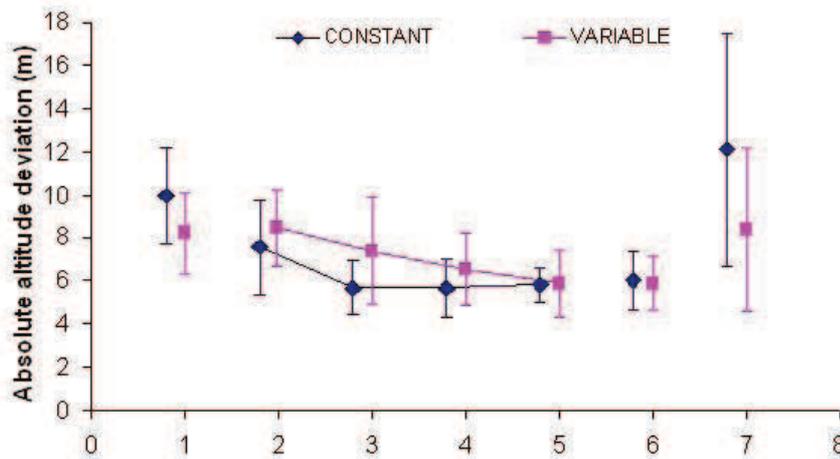


FIGURE 5.3 – Absolute altitude deviation for each experimental group in the different phases of Experiment 1 (pretest, acquisition phase, retention test, and transfer test). The data presented for Days 1 to 4 concern the additional blocks without feedback.

Frequency of Feedback Requests

Figure 5.4 presents the frequency of requests for each participant in the constant group (left panel) and variable group (right panel). A qualitative inspection of the figure does not show a substantial reduction in the amount of requests across the acquisition phase. Participants did show individual differences in the use of the feedback. For instance, in the constant group, Participant 3 (triangles) frequently asked

for feedback throughout the acquisition phase and Participant 5 (crosses) decreased the number of requests from Day 1 to Day 2. Despite these individual differences, participants in both groups reached a reasonably high level of performance.

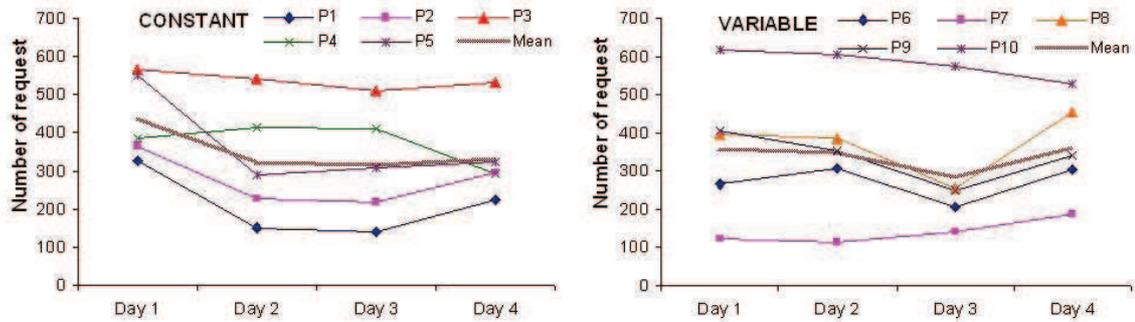


FIGURE 5.4 – Frequency of requests during the acquisition phase for participants in the constant group (P1 to P5) and variable group (P6 to P10) of Experiment 1.

Discussion

Our goal in the present experiment was to determine whether variability of practice facilitates the final approach phase in landing. As in classical variability of practice experiments, participants practiced under variable or constant conditions. The variable group outperformed the constant group in the transfer test. This is consistent with previous findings (e.g., Buekers, 1995; Shea & Morgan, 1979). A possible explanation of the result is the following: Variable practice leads to a quicker change in variable use, and hence to a larger improvement in performance, because it reduces the usefulness of initially used informational variables. Experiment 2 further explores this interpretation.

Experiment 2

This experiment further explores variability-of-practice effects in the learning of the final approach phase. Participants in a first practice condition, the fixed cockpit condition, practiced with a constant eye height and with trial-to-trial variability applied to texture density and runway width. Participants in a second condition, the fixed runway condition, practiced with a constant runway width and with variability applied to texture density and eye height. A first transfer test was performed under

the conditions of the fixed runway practice and a second one under the conditions of the fixed cockpit practice. We hypothesized that the fixed cockpit group would maintain a high level of performance in the fixed-cockpit transfer test and have a decreased level of performance in the fixed-runway transfer test. The opposite profile of results was predicted for the fixed runway group. In addition, we fit a quantitative model of perceptual learning (Jacobs & Michaels, 2007) to further explore the claim that variability-of-practice effects are related to the education of attention and to the usefulness of informational variables during practice.

Method

Participants

Ten students and faculty members (mean age = 28.1, SD = 2.92) participated in the experiment. All of them had normal or corrected-to-normal vision. They were divided into two groups of equal size (n=5). Participants had no prior flight experience and they were not informed about the purpose of the study.

Experimental Groups

The two groups were : fixed cockpit and fixed runway. The acquisition phase was organized differently for these groups. For the fixed cockpit group, trial-to-trial changes were applied to texture density and runway width, but eye height was held constant. For the fixed runway group, trial-to-trial changes were applied to texture density and eye height, but runway width was held constant. The individual experimental factors were varied as in the variable practice condition of Experiment 1. The values of the factors that were not varied were as in the constant practice of that experiment.

Task, Apparatus, Procedure, and Dependent Variables

The task, apparatus, and procedure were as in Experiment 1, with exception that two transfer tests were used instead of one. A first transfer test was performed with fixed runway conditions and a second transfer test with fixed cockpit conditions. The transfer tests consisted of 10 trials. The order of the transfer tests was counterbalanced among participants. We also computed the same dependent variables as in Experiment 1 : percentage of time in glide slope area, altitude deviation and frequency of feedback requests.

Quantitative Model Predictions

To analyze the informational variables used after practice we compared the observed trajectories to the trajectories predicted by a model. This type of analysis cannot be applied to the pretest and retention test, and neither to the test phases of Experiment 1, because it requires variability in the experimental factors. The model predictions were based on the 20 trials of the combined transfer tests. For these analyses we used data observed between 2000 and 500 m before the landing point. The model predictions were computed as follows.

For each participant we first computed the relative H angle that best predicted his or her flight trajectories, assuming that the participant controlled the aircraft so as to maintain the relative H angle constant. To do so we started with 50 equidistant relative H angles in a range from 4.5° to 6.1° . For each of these 50 values we computed the 20 approach trajectories (one for each transfer trial) for which the H angle had that particular value at each point of the trajectory⁴. We then computed which of the 50 sets of relative H angles predictions led to the lowest absolute altitude deviation between the predicted and observed trajectories. We use the notation $Hn(d)$ to refer to the flight altitude predicted on trial n , at distance d from the landing point, by the relative H angle that led to the best-fitting predictions for the considered participant.

In a similar way we computed, for each participant, the form ratio that best predicted the 20 trajectories observed in the transfer tests. Again, this means that we first computed the approach trajectories from which the runway is seen as having a particular optical length-over-width ratio, for each ratio in a range from 1.42 to 1.98 (in 50 equidistant steps), and then determined for which of the form ratios the computed trajectories best fitted the trajectories that were observed for the participant. We use the notation $Rn(d)$ to refer to the flight altitude predicted on trial n , at distance d from the landing point, by the best-predicting form ratio. For example, if $R3(1900)=102$ for a particular participant, then the best-fitting form ratio predicts that the flight altitude of that participant on the third transfer trial, at 1900 m before the landing point, is 102 m.

4. In order to compute the predicted trajectories one needs to know the pitch of the aircraft, because the pitch affects the relative H angle. We assumed the pitch to be constant throughout each approach. The constant pitch used for a particular trial was the average pitch observed for all trials with the same eye height. To compute the trajectories one also needs to know the visible reference point on the aircraft with regard to which the relative H angle is defined. We estimated this point to be 1.80 m in front of, 21 cm to the left, and 1 cm below the center of mass of the aircraft (defined for aircraft in horizontal position).

If a participant primarily used relative H angle to control altitude (i.e., if he or she flies so as to keep the relative H angle constant), then the $Hn(d)$ predictions should provide a good fit to the observed trajectories. In contrast, if a participant used the form ratio to regulate altitude, then the $Rn(d)$ predictions should provide better fits. More interestingly, it is also possible that observers relied on combinations of these two variables or on higher-order compound variables that can be described as such combinations. To address this possibility we computed compound predictions, C , according to the formula (5.1) :

$$Cn(d) = w \times Hn(d) + (1 - w) \times Rn(d) \quad (5.1)$$

in which w is a weight parameter that ranges between 0 and 1. For each participant we used the predictions $Hn(d)$ and $Rn(d)$, computed as described above, to determine the value of w for which the predictions $Cn(d)$ showed the best fit to the observed trajectories. In other words, for each participant we computed the value of w for which the observed trajectories showed the lowest absolute altitude deviation with respect to the predictions $Cn(d)$. Best-fitting w values that are close to 0 can be interpreted as evidence for the use of an informational variable that is more similar to the form ratio than to the relative H angle, and vice versa for w values that are close to 1.

Results

This section presents (1) ANOVAs on the percentage of time in the glide slope area, (2) a qualitative inspection of individual flight trajectories, (3) the quantitative modeling efforts, and (4) an analysis of the feedback requests.

Percentage of Time in Glide Slope Area

Figure 5.5 shows the time in the glide slope area (left panel) and the absolute altitude deviation (right panel) observed in Experiment 2. We report statistical analyses only for the percentage of time in the glide slope area. Analyses on altitude deviation are not reported because they led to similar results.

Pretest. A one-way ANOVA on the percentage of time within the glide slope area did not reveal a significant effect of experimental group, $F(1, 8) = 0.95$, $p > .05$.

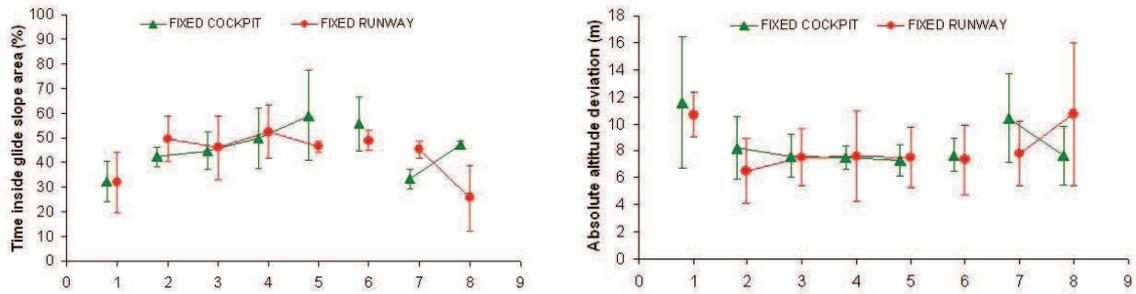


FIGURE 5.5 – ime flown within the glide slope area (left panel) and absolute altitude deviation (right panel) for fixed cockpit and fixed runway groups in the different phases of Experiment 2. The data presented for Days 1 to 4 concern the additional blocks of 5 trials without feedback. FC = Fixed cockpit transfer, FR = Fixed runway transfer.

Acquisition phase. A two-way ANOVA with Day (Days 1 to 4) as within-subjects factor and Group (fixed cockpit, fixed runway) as between-subjects factor was performed on the percentage of time within the area in the 15-trial acquisition blocks in which concurrent feedback was given. This analysis revealed a significant effect of Day, $F(3, 24) = 7.32, p < .05, \eta_p^2 = 0.47$. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) indicated that performance increased significantly from Day 1 to all other days ($p < .05$), for both groups. Analyses that used data from the additional blocks of 5 trials without concurrent and terminal feedback, shown in Figure 5, did not reveal significant effects ($p > .05$).

Retention test. A two-way ANOVA with Group (fixed cockpit, fixed runway) as between-subjects factor and Test Phase (pretest, retention test) as within-subjects factor was performed, again with percentage of time within the glide slope area as dependent measure. A significant effect was observed for Test Phase, $F(1, 8) = 16.95, p < .05, \eta_p^2 = 0.67$. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed an increase in performance from pretest to retention test for both groups ($p < .05$).

Transferts test. A two-way ANOVA with Group (fixed cockpit, fixed runway) as between-subjects factor and Test Phase (retention test, fixed cockpit transfer, and fixed runway transfer) as within-subjects factor was performed with percentage of time within the glide slope area as dependent measure. The analysis revealed significant effects of Test Phase, $F(2, 16) = 16.17, p < .05, \eta_p^2 = 0.67$, and Test Phase x Group, $F(2, 16) = 16.10, p < .05, \eta_p^2 = 0.66$. A posteriori comparisons (Newman-Keuls) revealed that the fixed ratio group performed better in the retention test and

in the fixed-ratio transfer test than in the fixed-runway transfer test ($p < .05$). The performance of the fixed ratio group was not found to differ between the retention test and the fixed-ratio transfer test. The profile of results was reversed for the fixed cockpit group : A posteriori comparisons did not reveal a difference between the retention test and the fixed-cockpit transfer test but performance significantly decreased for the fixed-ratio transfer test ($p < .05$). Finally, the analysis revealed a significant difference between the groups in the fixed-cockpit transfer test ($p < .05$), but in the fixed-ratio transfer test this difference did not reach significance ($p = .07$).

Used Informational Variables : Qualitative Inspection of Trajectories

The previous subsection showed that the fixed cockpit and fixed runway groups came to perform differently in the transfer tests. In our interpretation this is at least partly because the different types of variability led participants to converge toward different informational variables. The following subsections address evidence related to the use of informational variables.

Fixed cockpit participant. Figure 5.6 presents the time evolution of the altitude deviations of a representative participant in the fixed cockpit group, for two trials in the fixed-runway transfer test (left panel) and two trials in the fixed-cockpit transfer test (right panel).

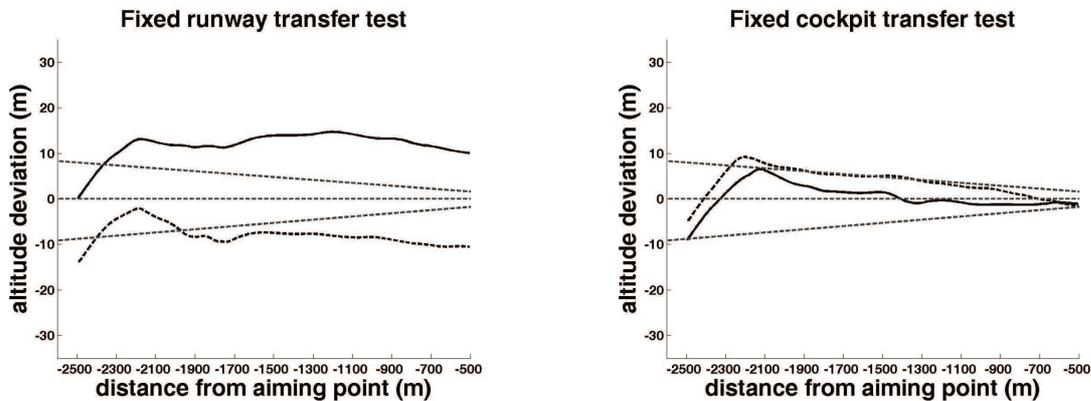


FIGURE 5.6 – Altitude deviations for two trials in the fixed-runway transfer test (left panel) and fixed-cockpit transfer test (right panel), for a representative participant in the fixed cockpit group of Experiment 2. The presented trials are the ones with the highest and lowest eye height (left panel) and with the widest and narrowest runways (right panel). The area between the dotted lines represents the glide slope area

The trials used in the fixed-runway transfer test are the ones with the highest and lowest eye heights. The participant flew higher, and frequently above the desired glide slope range, with the highest eye height (continuous curve) than with the lowest eye height (dashed curve). For higher eye heights one needs to flight higher in order to obtain the same relative H angle. The altitude differences shown in the left panel of the figure are therefore in agreement with reliance on the relative H angle. The trials presented for the fixed-cockpit transfer test are the ones with the widest runway (continuous curve) and narrowest runways (dashed curve). A less pronounced altitude difference is observed for these trials. This seems to indicate that the participant relied less on the form ratio than on the relative H angle.

Fixed runway participant. Figure 5.7 presents analogous data for a participant in the fixed runway group. The manipulations of eye height (left panel) had small but distinguishable effects on the altitude of the trajectories, in the directions predicted by the use of relative H angle. The manipulations of width of runway (right panel) gave rise to large altitude deviations. Note that both manipulations lead to the same regulation. One might tentatively interpret these findings as indicating that the performance of this participant was affected by both variables, at least to some extent. We next aim to confirm these qualitative observations with quantitative analyses.

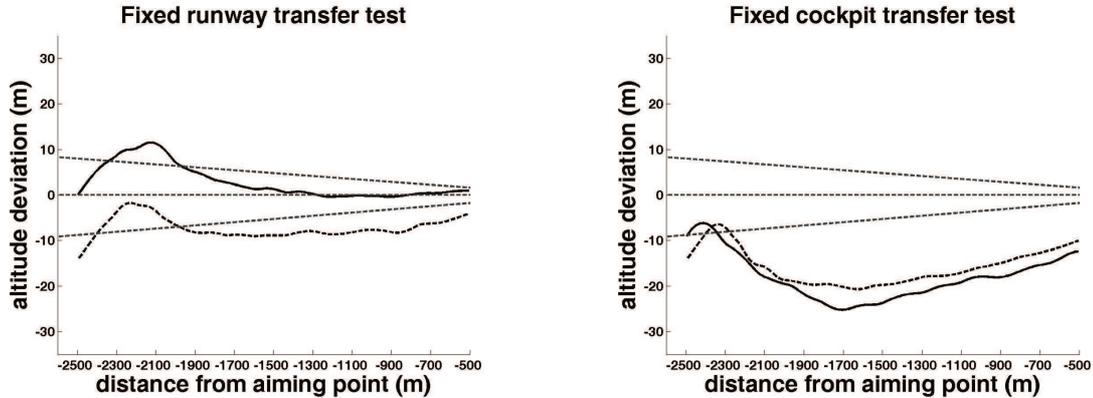


FIGURE 5.7 – Altitude deviations for two trials in the fixed-runway transfer test (left panel) and fixed-cockpit transfer test (right panel), for a representative participant in the fixed runway group of Experiment 2. The presented trials are the ones with the highest and lowest eye height (left panel) and with the widest and narrowest runways (right panel). The area between the dotted lines represents the glide slope area

Used Informational Variables : Quantitative Modeling Results

Table 5.2 presents results of the quantitative model. First note that the altitude deviations, or fits, are lower for relative H angle than for form ratio. This means that the predictions based on relative H angle better approximate the observed trajectories than the predictions based on form ratio. Our main interest, however, is in the w values in the table. The trajectories predicted by the variable form ratio are associated to the value $w = 0$ and those predicted by relative H angle to $w = 1$. Other w values represent compound variables, or combinations of the predictions for relative H angle and form ratio (see Equation 5.1 above). For example, the trajectories of Participant 1 are best characterized by $w = .91$, meaning that the compound variable used by this participant places more weight on relative H angle than form ratio in the combination process.

Participant	Best Fitting w		Relative H Angle		Form Ratio	
	Value	Fit ⁵ (m)	Value (°)	Fit (m)	Value	Fit (m)
Fixed Cockpit Group						
1	0.91	8.47	5.35	8.54	1.71	13.76
2	0.99	6.41	5.15	6.41	1.84	16.02
3	0.81	10.55	5.06	10.73	1.88	15.19
4	0.84	9.88	5.38	10.02	1.67	13.95
5	0.78	7.16	5.25	7.79	1.75	14.65
Fixed Cockpit Group						
6	0.80	9.99	5.54	10.21	1.72	15.30
7	0.87	8.75	5.41	8.96	1.67	14.30
8	0.46	8.25	5.84	9.71	1.48	10.79
9	0.73	9.52	4.76	10.77	1.95	15.23
10	0.72	9.90	4.99	10.94	1.73	14.60

TABLE 5.2 – Best Fitting w Values, relative H angles, and Form Ratios and Associated Fits

The parameter w can be interpreted as the coordinate of a one-dimensional space (cf., Jacobs & Michaels, 2007 ; Jacobs, Silva, & Calvo, 2009). The left panel of Figure 5.8 presents this space together with Gaussian distribution functions. The peaks of the Gaussian curves are located at the group means of the w values and the widths of the curves are related to the within-group variance in the w values. The curves

5. Fit = Averaged absolute deviations between predicted and observed approach trajectories.

can be interpreted as follows : The higher the curve is for a particular group and above a particular point, the more likely it is that an individual in that group uses the compound variable represented by that point. The dashed curve lies further to the right than the continuous one, which is to say, closer to $w=1$, or relative H angle. This indicates that participants in the fixed cockpit group were more likely to use variables similar to the relative H angle. A t test for independent samples showed that the difference in the w values of the two experimental groups was significant ($p < .05$, single-tailed). Hence, the groups indeed used different informational variables in the transfer phase.

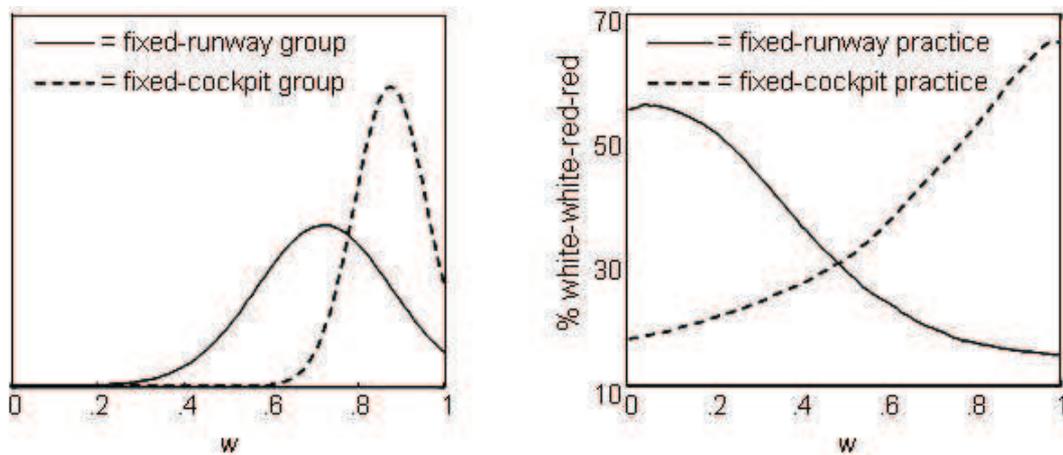


FIGURE 5.8 – Left : Gaussian distributions that indicate the best-fitting w values in the combined transfer tests for both experimental groups of Experiment 2. Right : Percentage of white-white-red-red feedback predicted by the use of the w values on the horizontal axis.

The right panel of Figure 5.8 gives the percentage of white-white-red-red feedback that a participant would receive during fixed runway practice (continuous curve) and fixed cockpit practice (dashed curve) if he or she controlled the aircraft using the informational variables represented by the points on the horizontal axis. The numerical simulations used to obtain these percentages assumed that the participant asks for feedback at randomly chosen moments, and that his or her altitude randomly fluctuates in a range from 10% below to 10% above the trajectories predicted by the w value. Furthermore, the predicted trajectories used in the simulations were based on a close to optimal calibration (i.e., value at which the informational variables are held constant). The curves in the right panel of the figure can be interpreted as

usefulness curves. Variables similar to form ratio (low w values) would lead to a higher percentage of satisfactory feedback than the use of variables similar to relative H angle (high w values) in the fixed runway practice (continuous curve), and vice versa for the fixed cockpit practice (dashed curve). In other words, the fixed runway practice reduced the usefulness of the variables on the right side of the space (e.g., relative H angle) whereas the fixed cockpit practice reduced the usefulness of the variables on the left side of the space⁶ (e.g., form ratio).

The difference between the continuous and dashed curves in the right panel of Figure 8 is interesting for the following reason. Assume that the pre-training performance of participants can be characterized by a single distribution function that lies somewhere between the post-practice ones shown in the left panel of the figure. Also assume that, during practice, participants slowly change in variable use, or move through the space, so as to optimize the amount of satisfactory feedback that they receive. Given the usefulness curves in the right panel of the figure, this would mean that fixed runway participants would move to the left during the acquisition phase, and fixed cockpit participants to the right. Hence, taken together, these assumptions would explain the post-practice difference in variable use shown in the left panel of the figure. To anticipate the General Discussion, it might be useful at this point to note that the previous reasoning assumes the usefulness curves to be the inverse of the potential function of the learning process.

Let us conclude this subsection with two critical observations. First, other information spaces can also be used to analyze the present data. We report results for this single-dimensional one, coordinated by w , because it allows a clear distinction between the experimental groups, not because it leads to better fits than higher dimensional ones. Second, our analyses do not distinguish cue-combination and direct-perception approaches. Points in the space can be interpreted either as directly detectable compound variables or as combinations that need to be computed from multiple lower-order cues. The gist of the analyses, however, is the same for both interpretations : In the transfer phase the groups differed in variable use.

6. Note that the expected percentage white-white-red-red feedback is similar to the expected percentage of time flown in the glide slope area. We prefer to present the usefulness curves as the expected percentage white-white-red-red feedback because this percentage is directly observable. Obviously, a variable can guide learning only if it is observable.

Frequency of Feedback Requests

Figure 5.9 presents the frequency of requests for the fixed cockpit group (left panel) and the fixed runway group (right panel). The figure presents data for the entire acquisition phase for each participant. The figure shows a substantial reduction in the amount of requests across the experiment only for Participants 5 and 9. The figure also shows a high level of inter-participant variability in the use of the feedback, as was the case in Experiment 1.

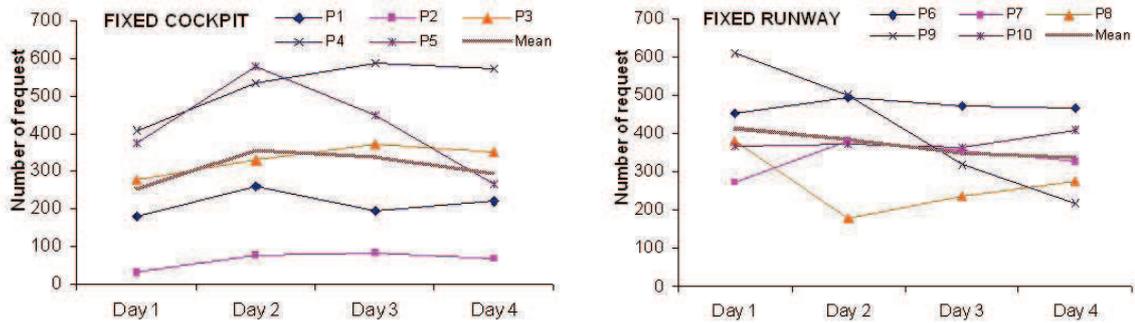


FIGURE 5.9 – Frequency of requests during the acquisition phase for participants in the fixed cockpit group (P1 to P5) and fixed runway group (P6 to P10) of Experiment 2.

Discussion

Experiment 2 compared the effects of two practice conditions : fixed cockpit and fixed runway practice. No significant group differences were observed in the pretest, practice, and retention test. As hypothesized, participants maintained a high level of performance in the transfer test with the same variability conditions as the ones that they encountered in practice, but not in the other transfer test. Significant post-practice group differences in variable use were observed. After practice participants were less likely to use variables whose usefulness was reduced in the specific practice conditions of their group.

Overall performance was better predicted by the relative H angle than by the form ratio. This might be related to the following (cf., Galanis et al., 1998). The relative H angle is defined using the horizon and a point on the aircraft, both of which are easily detectable. The relative H angle is detectable even from long distances to

the runway. In contrast, changes that occur in the form ratio are easier to detect from shorter distances, for which the optical size of the runway is large, than for longer distances, for which the optical size of the runway is small.

General Discussion

The present study concerns variability of practice and landing. Experiment 1 compared two practice conditions. Participants in the variable group were trained with trials in which variability was applied to three factors (runway width, texture density, and eye height in the cockpit). Participants in the constant group practiced without such variability. The improvement in performance in the acquisition phase was similar for both groups. The level of performance was also similar in a retention test. However, in a transfer test, which was performed with novel values on the three factors, the variable group performed better than the constant group.

We propose that variability-of-practice effects are related to the education of attention, which proceeds more quickly if initially used variables are less useful in practice (Jacobs et al., 2001; cf., Fajen & Devaney, 2006). It is reasonable to believe that participants in Experiment 1 initially relied to some extent on the relative H angle and on the form ratio (Galanis et al., 1998; Mertens, 1981; Mertens & Lewis, 1982). The usefulness of these variables was reduced in the variable practice because of the variability in runway width and eye height. This might have led participants to change in variable use and to come to rely on the more useful variables. Among the more useful variables is the absolute H angle, which is not affected by the type of variability that was applied.

Experiment 2 also compared two practice conditions. In the fixed cockpit condition, the eye position in the cockpit was held constant and variability was applied to texture density and runway width. In the fixed runway condition, the runway width was held constant and texture density and eye height changed from trial to trial. Transfer tests were conducted with fixed cockpit and fixed runway conditions. The fixed cockpit group maintained a high level of performance in the fixed-cockpit transfer test but not in the fixed-runway transfer test. The opposite pattern of results was observed for the fixed runway group. During practice, participants gradually shifted towards the informational variables that were useful under the specific practice conditions of their group. Hence, these results further support our interpretation of variability-of-practice effects in terms of the education of attention. To conclude this article we compare this interpretation with other interpretations.

The classical explanation for variability-of-practice effects is the one of Schmidt's (1975) schema theory. According to schema theory, learning consists of updating one's knowledge about the relation between parameters of a GMP and movement outcomes. In Schmidt's view, variable practice provides the learner with a more useful sample of parameter-set/movement-outcome pairs than constant practice. Schmidt's theory is typically applied to actions with short durations, such as reproducing one's signature. Landing an aircraft is an action with a much longer duration. In addition, the outcome of the action of landing is not determined by the control executed by the pilot, but by his or her control in interaction with changing circumstances. Schmidt's (1975) schema theory therefore does not provide a satisfactory explanation for the results of the present experiments.

Alternatively, a dynamical systems explanation holds that learning consists of a continuous movement through a space and that the movement through the space optimizes a certain performance-related quantity, referred to as potential function. Such processes are typically illustrated with the analogy of a particle sliding down the slope of the potential function (Figure 5.10). A main problem with this type of learning is that the system can be trapped in local minima. A certain level of variability, in this context equated with noise, can be beneficial because noisy systems are less easily trapped in local minima (Schöllhorn, Mayer-Kress, Newell, & Michelbrink, 2009). For example, a sufficient amount of random movement allows the particle in Figure 5.10 to escape the local minimum (left well) and proceed to the global minimum (right well). This explanation is often used metaphorically, without precise definitions of spaces and potential functions. Applied to our results, one could argue that the higher noise level in variable practice allowed participants to avoid being trapped in local minima, in contrast to the lower noise level in constant practice.

Although the dynamical systems explanation is more similar to our explanation than Schmidt's (1975) cognitivist one, important differences exist. One of these differences is the following. The dynamical systems explanation assumes that local minima exist with variable practice conditions as well as with constant practice conditions. With variability, or noise, the potential function is assumed to be the same, but the system is able to escape from the minima. In contrast, in our interpretation practice conditions determine the shape of the potential function or, stated slightly differently, the shape of the usefulness function. In the constant practice of Experiment 1, for example, all considered informational variables are equally useful. In representations that use a continuous space this means that the usefulness function is flat. With variability, some variables become less useful (relative H angle,

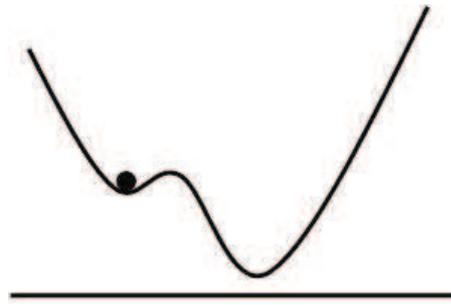


FIGURE 5.10 – Continuous space (horizontal axis) and an arbitrary potential function (continuous curve) with local and global minimum. A potential-based movement is often illustrated with the analogy of the overdamped movement of a particle (filled circle).

form ratio) while others maintain their specificity with approach angle (absolute H angle). This means that the usefulness function has a non-zero gradient, or non-zero steepness. Another example of how practice conditions determine the shape of a usefulness function is given in the right panel of Figure 5.8 ⁷.

To summarize, our results reveal that variability of practice is beneficial for the learning of the final approach phase. We propose an explanation for these results that is different from the explanations that we referred to as dynamical and cognitive. We believe that variability-of-practice effects are related to the education of attention. The education of attention is hypothesized to proceed faster with variable conditions because the usefulness of initially used informational variables is reduced in such conditions.

On a practical level the results of the present study have important implications for the design of flight training programs. In many current training programs low

7. A yet different explanation is motivated by the direct learning approach (Jacobs & Michaels, 2007; Jacobs et al., 2009). This approach holds that movement through an information or action space is guided by information for learning, which means that more learning occurs if and only if the exploited information for learning specifies more learning. To explain the beneficial effect of variability this approach must claim that performing an action under variable conditions leads to more information for learning than performing an action under constant conditions, which is a reasonable claim. The difference between the direct learning explanation and the explanation proposed in the present manuscript is that the direct learning does not claim a causal role of a potential function, or of the usefulness of informational variables, but of the closely related concept of information for learning. Even so, the direct learning view is more difficult to illustrate as long as one does not have a clear intuition about what the information for learning is.

levels of practice variability are used due to that fact that it is considered desirable for the flight simulation to always maintain a high level of similarity with real flight conditions (Gibb, Gray, & Scharff, 2010). For example, varying the eye of height of the pilot or removing/adding ground texture during training would be seen as unnatural manipulations. However, the present results indicate that these are exactly the types of manipulations that are needed to result in optimal pilot training.

Troisième partie

Épilogue

Quelles contributions théoriques ?

La modernisation des avions et les progrès technologiques réalisés ces dernières décennies ont permis de diminuer considérablement l'occurrence des accidents survenant en raison de problèmes techniques. Dès lors, l'attention s'est focalisée sur le pilote, plaçant ainsi le domaine de la formation et des facteurs humains comme éléments centraux dans les questions liées à la sécurité aérienne. Pour aborder cette problématique, il nous a donc paru nécessaire de mettre en étroite relation les connaissances scientifiques issues des théories de la perception et de l'action avec les préoccupations liées à la formation des pilotes. Ce travail doctoral s'inscrit directement dans cette perspective en s'intéressant à l'apprentissage de la phase d'approche lors d'un atterrissage. Ces travaux ont été menés avec la volonté de produire des réponses pratiques par l'intermédiaire d'un questionnement fondamental. C'est la raison pour laquelle, après avoir résumé les principaux résultats obtenus, nous discuterons des apports théoriques majeurs de ce travail avant d'expliquer les enseignements pratiques qu'il est possible d'en retirer.

Principaux résultats obtenus

La première partie de ce travail nous a tout d'abord permis de présenter différents aspects de l'atterrissage ainsi que les enjeux liés à la formation des pilotes. Nous avons montré que l'une des composantes majeures de la formation consistait à apprendre aux pilotes comment se diriger et contrôler la trajectoire de l'avion en utilisant les repères visuels extérieurs. Dans un second temps, une présentation détaillée de l'approche écologique de la perception et de l'action nous a permis de montrer que ce cadre théorique constituait un support pertinent pour étudier les mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent le contrôle de la phase d'approche. Enfin nous avons recensé divers outils et méthodes permettant de faciliter l'apprentissage et d'éduquer la perception des pilotes vers les variables informationnelles utiles au contrôle de l'action.

Expérience 1

Notre premier objectif consistait à évaluer les effets d'un feedback simultané⁸ à la demande sur le processus d'apprentissage et d'éducation de l'attention. Notre hypothèse était qu'un feedback simultané qui donne accès à l'état du système agent-environnement de manière artificielle, pouvait permettre à l'apprenant d'accéder plus facilement aux variables perceptives disponibles dans le flux optique. Nous

8. Pour rappel, le terme simultané est la traduction du mot anglais *concurrent* et désigne le fait que le feedback est donné aux participants pendant la réalisation de l'essai.

avons donc testé l'efficacité du feedback simultané à la demande à travers deux expériences différentes. Dans la première expérience (chapitre 3), la tâche consistait à marcher dans un couloir virtuel et à franchir des portes oscillantes lorsque l'ouverture le permettait. Les résultats montrent que le feedback simultané permet d'améliorer l'apprentissage de la tâche pour peu que celui-ci donne une information claire et précise, facilement interprétable par les participants. Par ailleurs, la diminution progressive du nombre de demandes du feedback au cours de la phase d'acquisition révèle la volonté des participants de s'affranchir le plus rapidement possible pour éviter tout phénomène de dépendance (cf., l'effet de guidage, Salmoni et al., 1984). Nous avons ensuite voulu reproduire ces résultats lors d'une tâche d'atterrissage d'aéronef et plus particulièrement pendant la phase d'approche (i.e., les deux derniers kilomètres avant de poser l'avion sur piste) réalisée sur un simulateur de vol à base fixe.

Expérience 2

Dans cette deuxième expérience (chapitre 4), la tâche consistait à diriger un avion vers la piste à l'aide d'un joystick en suivant une trajectoire d'approche idéale. Comme pour l'expérience précédente, le groupe qui présente le meilleur niveau d'apprentissage est celui qui dispose du feedback simultané à la demande. A la fin de l'expérience, des tests de transfert dans lesquels les variables informationnelles étaient manipulées de façon sélective nous ont permis d'identifier le support informationnel utilisé par les participants en fin d'apprentissage. Dans le premier test de transfert, le cockpit était supprimé. Dans le second, la largeur de la piste était réduite de moitié et enfin, dans le troisième, le sol était dépourvu de texture. Les résultats montrent que la suppression du cockpit donne lieu à une baisse du niveau de performance chez tous les participants tandis que les manipulations de la forme de la piste et du gradient de texture induisent des effets différents selon les sujets. Ces résultats suggèrent que les participants utilisent la variable perceptive angle H relatif de façon prépondérante.

Pour conclure ces deux premières expériences, les résultats mettent en évidence les effets bénéfiques du feedback simultané à la demande et illustrent la part active que peut prendre l'agent dans le processus d'éducation de l'attention vers les variables informationnelles pertinentes. Ces mécanismes seront détaillés du point de vue de l'approche écologique dans la partie suivante. Enfin, la dernière question que nous avons voulu aborder visait à comprendre l'influence d'une pratique variable sur l'apprentissage et le processus d'éducation de l'attention.

Expérience 3

L'objectif de notre dernier volet expérimental (chapitre 5) consistait à aménager les conditions de pratique pour permettre (1) au participant de maintenir un bon niveau de précision lors d'approches réalisées vers une nouvelle piste d'atterrissage dans des conditions visuelles difficiles (chapitre 5.1) et (2) de valider une méthode permettant d'éduquer l'attention des participants vers une variable informationnelle particulière choisie par l'expérimentateur (chapitre 5.2). Les résultats révèlent qu'un apprentissage réalisé dans des conditions de pratique variables permet au participant de maintenir un bon niveau de performance lorsqu'il est confronté à de nouvelles conditions d'atterrissage. De plus, en manipulant la variabilité des conditions de pratique de manière adéquate, nous avons rendu l'utilisation de certaines variables informationnelles inefficace. Les résultats montrent que nous avons réussi à éduquer l'attention du groupe cockpit fixe vers la variable informationnelle désirée (angle H relatif). Le groupe piste fixe, quant à lui, semble plutôt utiliser une combinaison d'informations composée à la fois de l'angle H relatif et de la forme de la piste. Ces résultats nous amèneront à discuter de l'effet de la variabilité de la pratique sur le processus d'éducation de l'attention ainsi que du statut des différentes variables informationnelles dans le cadre de l'apprentissage de la phase d'approche d'un avion.

Comment éduquer la perception ?

L'un des enjeux majeurs de ce travail de thèse était d'étudier différents moyens de faciliter l'apprentissage d'une nouvelle habileté perceptivo-motrice en s'appuyant sur l'approche écologique de la perception et de l'action. Pour cela, nous avons emprunté divers outils issus des approches traditionnelles, tels que le feedback ou l'aménagement des conditions de pratique, dans le but d'aider l'agent dans sa recherche de l'information utile au contrôle de l'action. Nous souhaitons donc expliquer les bénéfices liés à l'utilisation de tels outils et interpréter leurs effets en nous basant sur notre cadre théorique de référence.

Une nouvelle conception théorique du feedback simultané

Les expériences réalisées dans les chapitres 3 et 4 nous permettent de tirer plusieurs enseignements sur l'utilisation du feedback simultané à la demande. Rappelons que ce type de feedback est fourni pendant la réalisation de l'essai. Ainsi, nous avons fait l'hypothèse que ce feedback permettrait de créer une redondance entre l'information artificielle et l'information naturellement présente dans le flux perceptif, permettant alors de faciliter sa détection par les participants. De cette façon, le

feedback simultané à la demande permettrait d'atteindre plus rapidement un haut niveau d'habileté perceptivo-motrice. Ce point particulier mérite d'être mis en relation avec les différents processus impliqués dans l'apprentissage évoqués dans notre introduction. En effet, il convient de différencier les bénéfices liés à l'éducation de l'attention et ceux induits par la calibration (cf., partie 2.3). Nous supposons que le feedback simultané facilite l'éducation de l'attention en permettant une exploration perceptive plus rapide des différentes variables informationnelles disponibles dans l'environnement. Autrement dit, sur la base du feedback simultané, l'agent aurait l'opportunité de tester plus facilement la pertinence des différentes variables perceptives disponibles et donc de converger plus rapidement vers les variables informationnelles pertinentes. D'autre part, en découvrant une variable informationnelle pertinente au tout début de la phase d'acquisition, l'agent disposerait ensuite de davantage de temps de pratique pour calibrer et optimiser la relation entre l'information et le mouvement ou l'information et la propriété spécifiée par cette information. Pour les paragraphes qui vont suivre, il est important de préciser que les travaux réalisés au cours de cette thèse nous permettent de discuter de l'éducation de l'attention en s'appuyant sur des observations établies. A l'inverse, la partie concernant l'usage du feedback simultané à des fins de calibration est plus spéculative et doit par conséquent être considérée comme telle.

Lors des chapitres 3 et 4, plusieurs résultats nous permettent d'étayer ces hypothèses. Par exemple, les profils d'erreur courante observés lors du test de rétention dans notre première expérience (chapitre 3, cf., page 85) montrent que pour une même quantité de pratique, les participants qui disposaient du feedback simultané à la demande (groupe jauge) produisaient des régulations plus variées et mieux adaptées aux contraintes de la tâche que les autres groupes. De tels ajustements traduisent un haut niveau d'apprentissage et ne peuvent s'effectuer qu'à partir de l'utilisation d'une variable informationnelle pertinente et d'une calibration fine du cycle information-mouvement. En effet, les régulations produites montrent que sur la base de la variable informationnelle utilisée, les participants sont capables d'accélérer ou de ralentir pour franchir les portes correctement, ce qui n'est pas le cas des autres groupes qui systématisent un comportement de ralentissement. Par ailleurs, dans notre deuxième expérience, les tests de transfert dans lesquels les différentes variables informationnelles utiles au contrôle de la phase d'approche étaient manipulées ont entraîné une chute de la performance pour les trois groupes expérimentaux (PAPI, yoke et contrôle). Cette diminution de la performance était plus prononcée pour le groupe PAPI, traduisant ainsi la force du couplage établi entre l'information et le mouvement grâce aux processus d'éducation de l'attention et de calibration.

De façon plus spéculative, nous pensons que la transition entre les processus d'éducation de l'attention et de calibration peut être identifiée à partir d'une évolution dans l'utilisation du feedback simultané par les participants. Dans notre première expérience, cette évolution se traduit par la diminution du nombre de demandes du feedback au cours du temps. Au début de la phase d'acquisition, un grand nombre de demandes semble nécessaire aux participants pour trouver la variable informationnelle permettant de franchir les portes oscillantes correctement. À l'inverse, une fois le support informationnel identifié par le participant, ce dernier réduirait le nombre de demandes en même temps que l'utilisation de la variable informationnelle deviendrait de plus en plus efficace. Cette diminution marquerait ainsi le passage progressif entre le processus d'éducation de l'attention et celui de la calibration. Dans notre deuxième expérience, cette transition ne se caractérise pas par la diminution progressive des demandes du feedback mais par le changement de son statut au cours du temps. Au début de la phase d'acquisition, 40% des demandes interviennent lorsque le participant est à l'extérieur des limites caractérisant le plan de descente (i.e., le PAPI affiche une combinaison autre que deux lumières rouges et deux lumières blanches). Dans ce cas, le participant semble être à la recherche d'une variable informationnelle lui permettant de réaliser la tâche correctement. En fin de pratique, l'immense majorité des demandes (90%) intervient lorsque les participants sont sur le plan de descente. Dès lors, on peut penser que ces derniers ne cherchent plus à corriger leur erreur mais bien à vérifier et à calibrer l'utilisation de l'information qu'ils ont trouvée en début d'apprentissage.

Par ailleurs, les variabilités des moments et du nombre de demandes du feedback observées entre les deux expériences montrent combien la procédure de feedback à la demande est utile pour répondre aux besoins des participants. Cette procédure permet tout d'abord de donner le feedback de façon personnalisée et ainsi de répondre aux besoins précis de chaque participant. Par exemple, au cours de nos expériences, les groupes yoke n'ont jamais égalé le niveau d'apprentissage atteint par les groupes qui disposaient du feedback à la demande. Ils recevaient pourtant le feedback selon un programme (nombre et moment des demandes) qui avait permis aux participants des groupes « à la demande » d'atteindre un haut niveau d'apprentissage. Ce résultat suggère que l'utilisation du feedback simultané doit se faire de façon active et personnalisée. D'autre part, cette procédure permet de s'adapter aux caractéristiques de la tâche à réaliser. Les exigences des tâches proposées dans les deux premières expériences étaient relativement différentes. Dans la première expérience, les résultats montrent que les participants régulent leur vitesse de marche seulement quelques secondes avant de franchir les portes oscillantes. Ce comportement de régulation est cohérent avec de nombreuses études utilisant le même type

de tâche (Montagne, Buekers, Camachon, de Rugy, & Laurent, 2003 ; Camachon, Montagne, Buekers, & Laurent, 2004b ; Cinelli & Patla, 2008). En ce sens, les actions du participant lorsqu'il se trouve à plusieurs mètres des portes ne conditionnent pas forcément la réussite de l'essai. Dès lors, certains participants demandent le feedback tout au long de l'essai tandis que d'autres concentrent les demandes plutôt avant le franchissement des portes. Le niveau de contrainte de la tâche ne nécessite donc pas une organisation particulière dans les demandes du feedback. A l'inverse, dans la deuxième expérience, le participant doit contrôler sa trajectoire pour rester sur le plan de descente tout au long de la phase d'approche, cela nécessite donc des régulations devant être effectuées sur l'ensemble de l'essai. Dans ce cas, il émerge un profil spontané des demandes réparties sur l'ensemble de l'essai. Les profils de demandes du feedback sont donc révélateurs des contraintes que le participant doit prendre en compte pour apprendre à réaliser la tâche correctement. La procédure de dispense du feedback à la demande semble donc parfaitement adaptée pour répondre à des tâches relativement différentes.

Pour résumer, le début de l'apprentissage pourrait être un moment déterminant dans l'utilisation du feedback simultané. En effet, c'est au moment de la mise en place du cycle information-mouvement que l'agent est à la recherche de variables informationnelles pertinentes et qu'il a besoin d'être informé de la validité de l'information utilisée. L'utilisation faite par les participants du feedback en début de pratique illustre cette exploration perceptive et la recherche d'une variable informationnelle permettant de réaliser efficacement la tâche. Le participant utiliserait ensuite le feedback afin de calibrer la variable informationnelle trouvée en début d'apprentissage. Enfin, la différence d'utilisation du feedback entre les participants d'une même expérience, mais aussi entre les participants de l'expérience 1 et 2, illustre la part active que peut avoir l'agent dans son apprentissage et la pertinence d'une procédure autorisant un libre accès au feedback. Le feedback simultané à la demande permettrait donc une extraction active de l'information utile en favorisant les mécanismes d'éducation de l'attention et en aidant les participants à calibrer leur système perceptivo-moteur.

Une nouvelle lecture de la variabilité de la pratique

Si le feedback simultané permet d'aider le participant à explorer son environnement perceptif, l'expérimentateur n'est pas pour autant en mesure d'orienter l'attention de l'apprenant vers un support informationnel particulier. Lors de notre dernier volet expérimental, nous avons voulu affiner notre méthode d'apprentissage en contrôlant les variables informationnelles que l'agent viendrait à utiliser. Autre-

ment dit, nous souhaitons éduquer l'attention des participants vers une variable informationnelle choisie par l'expérimentateur. Jusqu'à présent, les effets liés à la variabilité de la pratique étaient sensés traduire une optimisation des mécanismes sous-tendant l'apprentissage. L'idée force consistait à penser que les variations de conditions de pratique permettaient d'améliorer le rappel ou la reconstruction des PMG et ainsi d'optimiser la sélection des différents paramètres du mouvement. Suite à l'utilisation que nous avons faite de cet outil d'apprentissage, nous proposons ici de livrer une analyse alternative basée sur le concept d'optimisation perceptive.

Rappelons tout d'abord que nous nous sommes inspirés des travaux de Jacobs et al. (2001) concernant l'éducation perceptive dans une tâche de jugement de masse. Dans cette expérience, les auteurs ont identifié les variables informationnelles utilisées par les participants en début d'apprentissage, afin de les manipuler et de les rendre inefficaces pendant la phase d'acquisition. Cela avait pour conséquence d'inciter les participants à explorer leur environnement perceptif à la recherche d'autres variables informationnelles. Dans la grande majorité des cas, les participants parvenaient à trouver et utiliser une variable informationnelle de haut rang. Lorsque ce n'était pas le cas, les participants utilisaient une variable informationnelle de bas rang leur assurant ainsi un niveau d'apprentissage minimal à la fin de l'expérience. Autrement dit, l'objectif était de détourner l'attention des participants d'une variable informationnelle donnée en leur laissant la possibilité d'utiliser n'importe quelle autre variable informationnelle disponible. Pour illustrer ces propos, nous pouvons faire une analogie avec une course d'orientation. La méthode de Jacobs et al. (2001) reviendrait à identifier la balise de départ (i.e., variable informationnelle utilisée au début de la pratique) et à fournir une carte de route en interdisant l'emprunt d'un chemin particulier (i.e., aménagement des conditions pour annuler la corrélation d'une variable informationnelle avec la propriété à laquelle elle est corrélée). Ainsi, le participant devrait explorer les différentes routes, sans être certain que cela le conduirait à trouver la balise d'arrivée, c'est-à-dire, la variable informationnelle de haut rang souhaitée par les expérimentateurs.

En utilisant la variabilité de la pratique, nous avons voulu pousser plus loin ce raisonnement. Plutôt que de détourner l'attention des participants de la « balise de départ » pour l'inciter à explorer l'environnement perceptif, nous avons voulu directement attirer leur attention vers « la balise d'arrivée ». Nous avons donc aménagé les conditions de pratique de manière à contraindre les participants vers l'utilisation d'une variable informationnelle choisie par l'expérimentateur. Pour cela, nous avons appliqué un protocole consistant à manipuler les conditions de pratique afin de rendre plusieurs variables informationnelles inutilisables par les participants. Il

nous semble important de préciser ce point particulier et d'expliquer de quelle façon la variabilité a permis d'influencer l'utilisation d'une variable perceptive.

Contrairement aux groupes expérimentaux mis en place par Jacobs et al. (2001) nous n'avons pas modifié la relation entre les variables informationnelles et la propriété à laquelle elles sont corrélées. Bien que la valeur de certaines variables informationnelles changeait d'un essai sur l'autre dans notre expérience (e.g., la hauteur des yeux dans le cockpit ou la forme de la piste), celles-ci permettaient toujours au pilote de contrôler sa trajectoire pour arriver avec un angle d'approche constant vers la piste. Rappelons que pour cela, il leur suffisait par exemple de maintenir l'angle H relatif (i.e., distance entre le point de visée et un point du cockpit) constant au cours du temps. Cependant, en faisant varier la hauteur des yeux dans le cockpit, la valeur de l'angle H relatif spécifiant une approche de 3° changeait d'un essai sur l'autre. Les participants étaient donc obligés, à chaque essai, de mettre en relation la pente d'approche à 3° avec une nouvelle valeur d'angle H relatif. Par conséquent, en appliquant la variabilité au début de la pratique, il était très difficile pour les participants de mettre en place le cycle information-mouvement sur la base d'une variable informationnelle variant constamment. Les participants étaient donc amenés à utiliser la variable informationnelle qui était la moins affectée par la manipulation des conditions de réalisation de la tâche. En tirant profit de la variabilité de la pratique, nous avons donc aménagé les conditions de manière à faire converger l'attention des participants vers une variable informationnelle particulière.

Nous avons vu que les résultats obtenus dans l'expérience 3 par le groupe cockpit fixe soutiennent clairement cette hypothèse. L'objectif pour ce groupe était d'éduquer l'attention des participants vers la variable informationnelle « angle H relatif ». Les différentes analyses effectuées montrent clairement que les participants utilisent cette variable perceptive après la phase de pratique. D'une part, l'analyse qualitative effectuée lors des tests de transferts a montré une modification des trajectoires d'approche en accord avec les manipulations de l'angle H relatif. De plus, les participants sont très peu affectés lors de la manipulation des autres variables informationnelles (i.e., la forme de la piste ou la densité de la texture). D'autre part, une analyse quantitative a permis de confirmer ces résultats, soulignant que la variabilité de la pratique pouvait permettre d'éduquer l'attention des participants de façon efficace. Cependant, les résultats obtenus pour le second groupe (cockpit fixe) sont contrastés et nécessitent des explications supplémentaires. En effet, l'objectif pour ce groupe était d'éduquer l'attention des participants vers la variable informationnelle « forme de la piste ». Les différentes analyses effectuées ont montré que les participants utilisaient plutôt une combinaison de plusieurs variables information-

nelles, reposant à la fois sur la forme de la piste et l'angle H relatif. Il nous semble qu'une possible explication de ce résultat puisse résider dans le statut des différentes variables informationnelles utiles au contrôle de la phase d'approche.

Statut des différentes variables informationnelles lors de la phase d'approche

A travers les différents chapitres de cette thèse, nous avons répertorié et manipulé diverses variables informationnelles permettant de contrôler la trajectoire de l'avion lors de la phase d'approche. Nous nous sommes notamment intéressés à l'influence de la forme de la piste, de l'angle H relatif ainsi qu'à la présence d'un sol plus ou moins texturé. Dans ce paragraphe, nous souhaitons mettre en perspective le rôle de l'angle H relatif et de la forme de la piste. Selon nos considérations théoriques, ces deux variables informationnelles ont le même statut ; dans la mesure où elles ne spécifient pas directement la valeur de l'angle d'approche, la forme de la piste et l'angle H relatif sont toutes deux des variables informationnelles de bas rang. Cependant, nos résultats montrent que les participants utilisent spontanément l'angle H relatif plutôt que la forme de la piste. En effet, les tests de transfert menés dans le chapitre 4 mettent en avant un effet massif de la suppression du cockpit (i.e., repère pour utiliser l'angle H relatif) sur le niveau d'apprentissage des participants. Comme nous l'avons mentionné précédemment, ces résultats sont confirmés dans le chapitre 5 lorsque l'on observe le "profil informationnel" (Figure 5.8) du groupe piste fixe. Alors que les participants devaient tendre vers une utilisation exclusive de la forme de la piste, ces derniers semblaient utiliser une combinaison d'informations dans laquelle l'angle H relatif joue un rôle assez important, suggérant ainsi que l'angle H relatif est une variable informationnelle plus facilement détectable que la forme de la piste.

Ce constat est en accord avec les conclusions établies par Galanis et al. (1998) selon lesquelles les variables informationnelles pourraient avoir une importance différente en fonction de la distance séparant le pilote de la piste d'atterrissage. Galanis et al. (1998) suggèrent que le début de la piste et le cockpit sont des repères facilement identifiables quel que soit l'éloignement et par conséquent, utilisés prioritairement lorsque le participant est loin de la piste. A l'inverse, la forme de la piste est difficile à détecter lorsque le pilote se situe à plusieurs kilomètres de celle-ci. Cette variable informationnelle serait d'autant plus utilisée que le pilote se rapproche de la piste. Lors de nos expériences, les participants débutaient l'essai en étant placé à plus de deux kilomètres de la piste d'atterrissage. On peut donc penser que les participants détectaient prioritairement la variable informationnelle angle H relatif

et qu'il leur était ensuite plus facile de continuer à utiliser la même variable informationnelle tout au long de l'essai plutôt que de changer. Cela pourrait expliquer l'importance relative de l'angle H dans la combinaison d'informations utilisée par les participants du groupe cockpit fixe.

Dès lors, il faut considérer que la mise en place de notre protocole d'éducation de l'attention a permis de faire en sorte que les participants du groupe cockpit fixe ne se focalisent pas uniquement sur l'angle H relatif mais prennent également en compte les informations liées à l'utilisation de la forme de la piste. Gageons qu'en présence d'un temps de pratique plus conséquent ou d'une variabilité permettant de rendre l'angle H relatif beaucoup plus difficile à utiliser, nous aurions probablement réussi à éduquer l'attention des participants de façon plus marquée vers la variable informationnelle « forme de la piste ». D'autres expériences pourraient nous permettre de tester cette hypothèse.

A travers cette réflexion, la variabilité de la pratique nous amène aussi à questionner le rôle de l'invariant dans le processus d'apprentissage. A partir des trois mécanismes détaillés en introduction (éducation de l'intention, éducation de l'attention, calibration), l'apprentissage est défini comme le processus qui permet à l'agent d'accéder aux variables informationnelles les plus efficaces, c'est-à-dire à celles qui spécifient directement l'état du système agent-environnement (i.e., les invariants). Nous venons aussi de montrer que ni l'angle H, ni la forme de la piste ne répondent complètement à la description de l'invariant car ils ne permettent pas de spécifier à la fois une pente d'approche constante et la valeur d'angle d'approche de celle-ci. Les participants ont donc appris à contrôler la trajectoire d'approche de l'avion sur la base d'informations de bas rang. Autrement dit, ces résultats semblent montrer qu'il est possible d'atteindre un haut niveau d'apprentissage sans que le contrôle de l'action ne repose nécessairement sur la détection et l'utilisation d'un invariant. A ce titre, nos résultats semblent rejoindre les conclusions établies par Michaels et de Vries (1998 ; voir aussi Michaels et al., 2001) soulignant que le contrôle de l'action peut se faire à partir de variables informationnelles de bas rang et/ou de haut rang. En suivant les propositions de ces mêmes auteurs, il serait théoriquement possible d'inciter les participants à chercher un probable invariant de l'atterrissage en augmentant les contraintes spatio-temporelles de la tâche. Il suffirait pour cela de remplacer le « cône de descente » par un plan strict de 3° pour conduire les participants à utiliser une variable informationnelle en mesure de donner accès précisément à l'état du système agent-environnement et pourquoi pas un invariant de l'atterrissage.

Effet de la calibration sur l'apprentissage de la phase d'approche

L'un des aspects innovants de ce travail réside dans notre utilisation et notre interprétation de la variabilité de la pratique. Lors de notre dernier volet expérimental et dans cet épilogue, nous avons discuté des mécanismes qui lient la variabilité de la pratique et le processus d'éducation de l'attention. Cependant, il reste encore à déterminer l'effet que cet outil pourrait avoir sur le processus de calibration. Rappelons que la calibration désigne le processus permettant d'améliorer la détection de l'information et d'ajuster l'utilisation de celle-ci pour la mettre en relation avec le mouvement à produire. Par exemple, la calibration pourrait permettre d'aider le pilote à détecter la valeur de l'angle spécifiant une phase d'approche à 3° . Nous suggérons alors de procéder en deux étapes. La première consisterait à éduquer l'attention du participant vers la variable informationnelle désirée, par exemple, l'angle H relatif. La seconde étape viserait ensuite à soumettre le participant à une série d'essais dans laquelle l'angle H relatif serait manipulé d'un essai sur l'autre pour sensibiliser le pilote à la valeur d'angle correspondant à une approche de 3° .

Le pilote disposerait ainsi d'une méthode d'apprentissage qui l'aiderait à se focaliser sur une variable informationnelle lui permettant de se placer sur une trajectoire d'approche de 3° . De manière spéculative, on peut aussi penser qu'en étant confronté à une pratique variable, l'optimisation et la calibration du cycle information-mouvement permettrait au pilote d'être plus performant lorsqu'il doit atterrir sur une piste dont la pente d'approche est différente. Ici encore, de nouvelles expériences sont nécessaires pour tester ces hypothèses.

Conclusions

Au-delà des nouvelles conceptions théoriques proposées pour l'utilisation du feedback simultané et de la variabilité de la pratique, ces travaux s'articulent avec les rares contributions théoriques précédentes (Camachon, 2004 ; Jacobs, 2001) et visent à livrer une analyse approfondie des mécanismes qui permettent d'améliorer l'apprentissage perceptivo-moteur. D'une part, nous avons démontré que les outils d'apprentissage « traditionnels » pouvaient s'intégrer dans une conception écologique de l'apprentissage. D'autre part, nous avons étendu avec succès les recherches menées par Jacobs et al. (2001) sur l'apprentissage perceptif et l'éducation de l'attention à une problématique perceptivo-motrice. Pour cela, il était indispensable de mettre au point un protocole permettant à l'agent de mettre en place et d'optimiser le cycle information-mouvement. C'est pourquoi l'utilisation d'un feedback simultané,

en plus d'un feedback terminal permettant au participant de connaître le résultat de son action, s'est avérée précieuse. Enfin, nous avons proposé une nouvelle façon de concevoir l'aménagement des conditions de pratique pour éduquer l'attention des participants. Si Jacobs et al. (2001) souhaitaient empêcher l'utilisation d'une variable informationnelle particulière en début de pratique pour provoquer une exploration perceptive, notre volonté était plutôt de faire converger la perception des participants directement vers une variable informationnelle donnée. Bien que la connaissance des principales variables informationnelles potentielles constitue un préalable obligatoire, l'aménagement de la pratique proposé au cours de ce travail nous a permis d'éduquer l'attention des participants vers une variable informationnelle précise.

Pour conclure, les résultats obtenus à travers les différents volets expérimentaux de cette thèse démontrent en premier lieu, la pertinence du niveau d'analyse choisi. À partir des relations existantes entre une information et le mouvement, nous avons pu inférer et mettre à l'épreuve des hypothèses sur les processus qui sous-tendent l'acquisition d'habiletés motrices complexes et nouvelles. De plus, les réponses apportées dans le cadre de cette thèse suggèrent que l'approche écologique de la perception et de l'action constitue un cadre pertinent pour s'intéresser à la problématique de l'apprentissage ; c'est pourquoi nous sommes convaincus que l'étude des processus d'acquisition d'une nouvelle habileté perceptivo-motrice est une piste de recherche des plus porteuses pour les années à venir.

Valorisation de la recherche et retombées potentielles

Ces travaux répondent à une volonté d'élargir les connaissances fondamentales liées à l'apprentissage. Néanmoins, à travers les différentes expériences mises en place, nous pouvons tirer quelques enseignements d'ordre pratique. Bien que ces idées demandent encore à être validées sur le plan expérimental, elles peuvent déjà alimenter la réflexion menée autour d'une recherche appliquée, directement utilisable pour concevoir de nouvelles méthodes, procédés ou procédures d'apprentissage.

Environnement virtuel et formation

Les trois expériences présentées au sein de ce manuscrit ont été menées sur une plate-forme de réalité virtuelle. Il est maintenant courant d'utiliser ce genre de dispositif pour étudier le comportement humain. Par exemple, les chercheurs en sciences du comportement ont mis en œuvre des dispositifs expérimentaux permettant de manipuler et de contrôler les variables informationnelles ainsi que les conditions de pratique⁹ afin de mieux comprendre les déterminants sensoriels et moteurs du fonctionnement humain (Tarr & Warren, 2002). Ces recherches couvrent des activités très variées telles que le contrôle visuel de la locomotion (Buekers, Montagne, de Rugy, & Laurent, 1999), l'activité d'un gardien de but au handball (Bideau et al., 2003) et en football (Craig, Berton, Rao, Fernandez, & Bootsma, 2006) ou l'interception de mobile (Bastin, Fajen, & Montagne, 2010). Un autre domaine d'application de la réalité virtuelle, directement en lien avec nos travaux, concerne celui de la formation et de l'apprentissage. De nos jours, les simulateurs de vol ou de conduite sont de plus en plus utilisés pour acquérir dans des conditions relativement sûres, les habilités nécessaires pour réaliser une activité future (Loomis, Blascovich, & Beall, 1999). En ce sens, nos expériences constituent un exemple pratique permettant de questionner le mode de présentation du feedback au sein d'un environnement virtuel.

Au cours de nos travaux, nous avons représenté le feedback simultanément sous la forme d'une jauge virtuelle, de portes fantômes (expérience 1) et d'un PAPI (expériences 2 et 3). Les deux premiers feedbacks simultanés indiquaient si l'ouverture des portes oscillantes permettait d'effectuer un franchissement correct lorsque le participant maintenait sa vitesse de marche constante au cours du temps tandis que le dernier feedback simultanément indiquait aux participants l'écart séparant l'avion du plan de descente désiré. Dans les deux cas, les participants disposaient d'une infor-

9. Dans le monde virtuel il est possible de manipuler les lois de la physique, par exemple en supprimant la gravité (e.g., Senot, Zago, Lacquaniti, & McIntyre, 2005) ou d'enrichir et d'appauvrir l'environnement virtuel (Todorov, Shadmehr, & Bizzi, 1997 ; François, Morice, Blouin, & Montagne, sous presse, sous presse)

mation qualitative sur la nature des régulations à produire (e.g., prendre ou perdre de l'altitude) et d'une information quantitative sur l'amplitude de ces régulations.

Les résultats montrent que le feedback simultané était bénéfique pour l'apprentissage si et seulement si celui-ci représentait une information claire et facilement interprétable pour le participant. En effet, la première expérience montre qu'une même information fournie de manière différente (jauge ou portes fantômes) pouvait induire des effets diamétralement opposés. Par exemple, la jaugue n'était pas incorporée en tant qu'objet faisant partie intégrante du monde virtuel 3D mais plutôt présentée comme « un outil » superposé à la scène visuelle. La jaugue n'était donc pas soumise à un effet de profondeur ou de perspective. En ce sens, elle permettait d'avoir clairement accès à la nature et à la quantité de régulation à produire, quelle que soit la position des participants dans le couloir. A l'inverse, les portes fantômes faisaient partie intégrante de l'environnement virtuel. La quantité d'erreur à réguler était donnée par la distance qui séparait les portes à franchir des portes fantômes (cf. Figure 3.2, page 78). Lorsque le participant était au début de l'essai et donc loin des portes, il lui était sans doute difficile d'estimer l'écart entre les portes à franchir et les portes fantômes. Autrement dit, l'aspect quantitatif de l'information véhiculée par ce feedback était difficilement utilisable par le participant.

De plus, on peut également penser qu'en intégrant les portes fantômes comme un objet de l'environnement virtuel, celles-ci ont interféré avec les informations visuelles naturellement présentes dans le flux optique. La présentation, au même endroit de la scène visuelle, de l'information artificielle et des informations naturelles du flux optique, aurait pu donner lieu à une confusion par le participant. En d'autres termes, les participants étaient incapables de dissocier l'information artificielle de l'information naturelle réelle. La juxtaposition des informations aurait donc annulé la fonction principale du feedback qui était de faciliter l'accès aux variables perceptives disponibles dans le flux optique expliquant alors le faible niveau d'apprentissage atteint par les participants du groupe portes fantômes lors du test de rétention.

Ces résultats suggèrent que l'information artificielle donnée à l'agent au cours de la pratique ne doit pas être affichée à l'endroit où le participant prélève l'information utile dans le flux afin de ne pas interférer avec celle-ci. De plus, l'affichage du feedback doit permettre à l'agent d'accéder facilement aux différentes modalités de l'information (i.e., qualitative et/ou quantitative) sous peine de nuire à l'apprentissage. Concrètement, ces résultats pourraient être exploités pour assister les opérateurs de drones dans des tâches de pilotage et d'atterrissage lorsque les appareils sont dépourvus de systèmes automatisés. En effet, les opérateurs pilotent le

drone via des informations visuelles d'une caméra fixée sur le drone et d'un tableau de commandes indiquant différents paramètres de vol (vitesse, altitude). Des expériences pourraient nous permettre de tester s'il serait aussi intéressant d'inclure, au sein de cette station, des informations sous la forme de feedback simultané représentant l'état courant du système agent-environnement en plus des paramètres particuliers tels que l'altitude ou la vitesse. Une telle représentation des informations pourrait aussi faciliter le contrôle du drone en donnant accès à des informations qu'il est difficile de percevoir devant un simple écran en deux dimensions.



FIGURE 5.11 – Représentation d'un système de visualisation tête haute. Les informations de bords sont superposées à l'environnement extérieur.

Enfin, ces résultats donnent quelques pistes pour l'aménagement des postes de pilotage. De nos jours, la plupart des avions militaires sont équipés de système de visualisation tête haute (VTH). Ce système consiste à superposer les informations nécessaires au pilotage, à la navigation ou à la réalisation de la mission sur l'environnement extérieur (Figure 5.11). Ainsi, le pilote peut disposer des principales informations fournies par les instruments de bords sans quitter des yeux son environnement. Pris dans leur ensemble, nos résultats nous amènent à penser, d'une part, que la compréhension des informations utilisées par les pilotes constitue un enjeu majeur pour sélectionner les plus pertinentes d'entre elles et d'autre part, que leur représentation dans une interface virtuelle par l'intermédiaire de feedback simultané est un élément qu'il est indispensable de maîtriser pour guider de façon pertinente la construction de nouveaux équipements.

Une nouvelle façon d'envisager la formation

Notre manière de concevoir l'apprentissage de la phase d'approche est relativement différente de celle qui est envisagée dans les écoles de pilotage. En effet, la formation telle qu'elle est conçue actuellement se fait sur la base de méthodes d'apprentissage explicite. Ce type de procédure implique de donner directement à l'apprenant les repères qu'il doit utiliser pour contrôler l'avion. Par exemple, les manuels de pilotage décrivent précisément que la direction du déplacement lors de l'atterrissage correspond à un point visuel qui ne subit aucune transformation optique au cours du temps (i.e., description vulgarisée du focus d'expansion optique

appelé point d'aboutissement dans le domaine aéronautique). De la même façon, pour apprendre au pilote débutant à effectuer ses premières approches vers la piste d'atterrissage, l'instructeur indique tout au long de la trajectoire des repères particuliers correspondant à des altitudes précises tels que « au dessus du château d'eau, tu dois être à une hauteur de 1000 pieds puis au dessus de cet étang tu dois être à 500 pieds ». Autrement dit, l'exercice du circuit de piste tel que nous l'avons présenté au début de ce travail (cf. Figure 1.1) consiste pour le pilote débutant à réaliser un ensemble de manœuvres consécutives (étape de base, alignement, etc.) à travers un enchaînement de connaissances procédurales.

A l'inverse, les travaux réalisés au sein de cette thèse s'appuient sur une méthode d'apprentissage dite implicite. L'apprentissage implicite consiste à donner des indications permettant à l'apprenant de découvrir par lui-même l'information pertinente au regard de l'action réalisée, sans développer de connaissances conscientes sur la dite information. Plus formellement, Masters (1992) explique que l'apprentissage moteur implicite « renvoie à l'acquisition passive d'un répertoire de mouvements, sans accumulation correspondante de connaissances ou de règles explicites et verbalisables ». Le feedback simultané à la demande et la variabilité de la pratique s'inscrivent directement dans ce type de procédure d'apprentissage. En effet, ni le feedback simultané, ni la variabilité de la pratique n'indiquent de façon formelle les informations pertinentes à utiliser. Ils permettent pourtant aux participants d'atteindre un haut niveau d'apprentissage. La méthodologie élaborée dans ce travail de thèse pourrait donc compléter la formation traditionnelle des pilotes débutants. Par exemple, on peut imaginer qu'une première phase d'apprentissage réalisée en réalité virtuelle permettrait une sensibilisation perceptive à l'atterrissage et ainsi de renforcer la détection des informations pertinentes lors d'approches réalisées en conditions réelles. Une phase de formation en début d'apprentissage selon une procédure implicite pourrait permettre au pilote débutant d'utiliser plus efficacement les informations visuelles disponibles dans l'environnement et ainsi compléter l'ensemble des connaissances procédurales qu'il utilise lors de l'atterrissage.

Vers une méthode d'apprentissage générique

A l'heure actuelle, les expériences réalisées nous ont permis de dégager deux outils différents pour améliorer l'apprentissage (feedback simultané et variabilité de la pratique), ainsi qu'une méthode d'analyse permettant de connaître les informations utilisées par les participants en fin de pratique. Afin de livrer un outil de formation complet, la dernière étape consisterait à mettre en place un protocole visant à

identifier les informations utilisées en début de pratique. Il serait ainsi possible de dresser un profil perceptif caractérisant chaque pilote et de suivre avec exactitude l'exploration perceptive réalisée au cours de la phase de pratique. Cette procédure pourrait ensuite être proposée dans les écoles *de début* afin de compléter et renforcer la formation initiale des pilotes débutants. Le fait d'intégrer l'évaluation initiale du pilote nous permettrait aussi de proposer un agenda expérimental retraçant les différentes étapes de l'apprentissage de la phase d'approche en réalité virtuelle. Nous pensons qu'une méthodologie complète regroupe au moins trois étapes distinctes. En premier lieu, il convient d'identifier les informations visuelles utilisées en début de pratique par les débutants. Pour cela, il est possible d'utiliser la méthode mise en place lors de notre troisième expérience (chapitre 5). En proposant un test initial incluant des essais avec différentes formes de piste, textures et hauteurs de cockpit, il serait possible d'identifier le support informationnel utilisé en début de pratique. On peut même imaginer qu'appliquer ce procédé en début de pratique pourrait nous amener à découvrir d'autres informations de bas rang. La deuxième étape consisterait ensuite à utiliser la variabilité de la pratique et le feedback simultané à la demande tel que nous l'avons fait dans cette thèse pour éduquer l'attention des pilotes débutants vers une information particulière. Enfin, pour s'assurer des effets de cette méthode, la dernière étape viserait à démontrer que les participants utilisent bien l'information ciblée par les expérimentateurs au moyen de tests de transfert ou par une analyse de l'espace d'information.

Il sera intéressant, dans l'avenir, d'éprouver les différentes étapes de cet agenda expérimental à travers un éventail de tâches variées et complexes. En effet, nous pensons qu'au delà de la formation des pilotes d'avion, cette méthode pourrait constituer une base solide pour s'intéresser à l'ensemble des habiletés perceptivo-motrices qui nécessitent une formation longue et coûteuse. Ces recherches pourraient ainsi constituer un socle fondamental permettant de faciliter l'apprentissage du vol à basse altitude ou bien de compléter la formation des opérateurs de drones. Plus largement, la mise à l'épreuve de cette agenda expérimental permettra de le faire évoluer jusqu'à, peut être, devenir une méthode générique de l'apprentissage perceptivo-moteur.

Bibliographie

Bibliographie

- Amazeen, E., Amazeen, P., Post, A., & Beek, P. (1999). Timing the selection of information during rhythmic catching. *Journal of Motor Behavior*, *31*(3), 279–289.
- Bardy, B., & Laurent, M. (1998). How is body orientation controlled during somersaulting? *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *24*(3), 963–77.
- Bastin, J., Craig, C., & Montagne, G. (2006). Prospective strategies underlie the control of interceptive actions. *Human Movement Science*, *25*(6), 718–732.
- Bastin, J., Fajen, B., & Montagne, G. (2010). Controlling speed and direction during interception : an affordance-based approach. *Experimental Brain Research*, *201*(4), 763–780.
- Battig, W. (1972). Intratask interference as a source of facilitation in transfer and retention. In I. R. Thompson, & J. Voss (Eds.) *Topics in learning and performance*, (pp. 131–159). New York : Academic Press.
- Beal, A., & Loomis, J. (1997). Optic flow and visual analysis of the base-to-final turn. *International Journal of Aviation Psychology*, *7*, 201–223.
- Benbassat, D., & Abramson, C. (2002). Landing flare accident reports and pilot perception analysis. *International Journal of Aviation Psychology*, *12*(2), 137–152.

BIBLIOGRAPHIE

- Berg, W., Wade, M., & Greer, N. (1994). Visual regulation of gait in bipedal locomotion : revisiting Lee, Lishman, and Thomson (1982). *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 20(4), 854–863.
- Berndt, J. (2004). JSBSim : An Open Source Flight Dynamics Model in C++. In *AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, (p. 4923). American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper, Providence, RI.
- Bertrand, A., & Garnier, P. (2005). *Psychologie cognitive*. Levallois-Perret : Studyrama.
- Bideau, B., Kulpa, R., Ménardais, S., Fradet, L., Multon, F., Delamarche, P., & Arnaldi, B. (2003). Real handball goalkeeper vs. virtual handball thrower. *Presence : Teleoperators and Virtual Environments*, 12(4), 411–421.
- Boeing (2010). Statistical summary of commercial jet airplane accidents, worldwide operations 1959-2009. *from /www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf*.
- Bootsma, R. (1998). Ecological movement principles and how much information matters. In I. A. Post, J. Pijpers, P. Bosch, & M. Boschker. (Eds.) *Models in Human Movement Science*, (pp. 51–63). Print Partners Ipskamp, Enschede.
- Bootsma, R., & Craig, C. (2002). Global and local contributions to the optical specification of time to contact : Observer sensitivity to composite tau. *Perception*, 31(8), 901–924.
- Bootsma, R., & van Wieringen, P. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 16(1), 21–29.
- Buekers, M. (1995). L'apprentissage et l'entraînement des habiletés motrices et sportives. In I. J. Bertsch, & C. L. Scanff (Eds.) *Apprentissages moteurs et conditions d'apprentissage*, (pp. 27–47). Paris : PUF.
- Buekers, M., Montagne, G., de Rugy, A., & Laurent, M. (1999). The regulation of externally paced human locomotion in virtual reality. *Neuroscience Letters*, 275(3), 171–174.
- Camachon, C. (2004). *Vers une conception écologique de l'apprentissage perceptivo-moteur : l'exemple des déplacements locomoteurs finalisés en réalité virtuelle*. Ph.D. thesis, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II.

- Camachon, C., Buekers, M., & Montagne, G. (2004a). Is the learning of goal-directed displacement effector-independent? *Human Movement Science, 23*(3-4), 239–255.
- Camachon, C., Jacobs, D., Huet, M., Buekers, M., & Montagne, G. (2007). The role of concurrent feedback in learning to walk through sliding doors. *Ecological Psychology, 19*(4), 367–382.
- Camachon, C., Montagne, G., Buekers, M., & Laurent, M. (2004b). Learning to use visual information. *Ecological Psychology, 16*(2), 115–128.
- Catalano, J., & Kleiner, B. (1984). Distant transfer in coincident timing as a function of variability of practice. *Perceptual and Motor Skills, 58*(3), 851–856.
- Chapman, S. (1968). Catching a baseball. *American Journal of Physics, 36*(10), 868–870.
- Chiviawowsky, S., & Wulf, G. (2002). Self-controlled feedback : does it enhance learning because performers get feedback when they need it? *Research Quarterly for Exercise and Sport, 73*(4), 408–15.
- Chiviawowsky, S., & Wulf, G. (2005). Self-controlled feedback is effective if it is based on the learner's performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 76*(1), 42–48.
- Cinelli, M., & Patla, A. (2008). Task-specific modulations of locomotor action parameters based on on-line visual information during collision avoidance with moving objects. *Human Movement Science, 27*, 513–531.
- Cinelli, M., Patla, A., & Allard, F. (2008). Strategies used to walk through a moving aperture. *Gait & Posture, 27*(4), 595–602.
- Craig, C., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L., & Bootsma, R. (2006). Judging where a ball will go : the case of curved free kicks in football. *Naturwissenschaften, 93*(2), 97–101.
- Crossman, E. (1964). Information processes in human skill. *British Medical Bulletin, 20*(1), 32–37.
- de Rugy, A., Taga, G., Montagne, G., Buekers, M., & Laurent, M. (2002). Perception–action coupling model for human locomotor pointing. *Biological Cybernetics, 87*(2), 141–150.

BIBLIOGRAPHIE

- DGAC (2008). Rapport sur la sécurité aérienne. *from <http://www.aviation-civile.gouv.fr/html/actugd/secu3/rapportsecurite/rapportsecurite.html>*.
- Duchon, A., Kaelbling, L., & Warren, W. (1998). Ecological robotics. *Adaptive Behavior*, 6(3-4), 473–507.
- Duchon, A., & Warren, W. (2002). A visual equalization strategy for locomotor control : Of honeybees, robots, and humans. *Psychological Science*, 13(3), 272–278.
- FAA (2004). Airport traffic pattern. In *Airplane Flying Handbook*. Washington DC : Federal Aviation Administration.
- Fajen, B., & Devaney, M. (2006). Learning to control collisions : The role of perceptual attunement and action boundaries. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 32(2), 300–313.
- Farrow, D., Chivers, P., Hardingham, C., & Sachse, S. (1998). The effect of video-based perceptual training on the tennis return of serve. *International Journal of Sport Psychology*, 29, 231–242.
- Fialho, J., Benda, R., & Ugrinowitsch, H. (2006). The contextual interference effect in a serve skill acquisition with experienced volleyball players. *Journal of Human Movement Studies*, 50(1), 65–78.
- Flach, J., Hagen, B., & Larish, J. (1992). Active regulation of altitude as a function of optical texture. *Perception & Psychophysics*, 51(6), 557–568.
- Flach, J., & Warren, R. (1995). Low altitude flight. In I. P. Hancock, J. Flach, J. Caird, & K. Vicente (Eds.) *Local applications of the ecological approach to human-machine systems*, (pp. 65–103). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- Flach, J., Warren, R., Garness, S., Kelly, L., & Stanard, T. (1997). Perception and control of altitude : splay and depression angles. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 23(6), 1764–82.
- François, M., Morice, A., Blouin, J., & Montagne, G. (sous presse). Age-related decline in sensory processing for locomotion and interception. *Neuroscience*.
- Galanis, G., Jennings, A., & Beckett, P. (1998). A mathematical model of glide-slope perception in the visual approach to landing. *International Journal of Aviation Psychology*, 8(2), 83–101.

- Galanis, G., Jennings, A., & Beckett, P. (2001). Runway width effects in the visual approach to landing. *International Journal of Aviation Psychology*, 11(3), 281–301.
- Gibb, R. (2007). Visual spatial disorientation : Revisiting the black hole illusion. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 78(8), 801–808.
- Gibb, R., Gray, R., & Scharff, L. (2010). *Aviation Visual Perception : Research, Misperception and Mishaps*. Ashgate Publishing Ltd.
- Gibb, R., Schvaneveldt, R., & Gray, R. (2008). Visual misperception in aviation : Glide path performance in a black hole environment. *Human Factors*, 50(4), 699–711.
- Gibson, E., Gibson, J., Smith, O., & Flock, H. (1959). Motion parallax as a determinant of perceived depth. *Journal of Experimental Psychology*, 58(1), 40–51.
- Gibson, J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston, MA : Houghton Mifflin.
- Gibson, J. (1958). Visually controlled locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, 49, 182–194.
- Gibson, J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston, MA : Houghton Mifflin.
- Gibson, J. (1979). *The ecological approach to perception*. Boston, MA : Houghton Mifflin.
- Gibson, J., Olum, P., & Rosenblatt, F. (1955). Parallax and perspective during aircraft landings. *American Journal of Psychology*, 68, 372–385.
- Gillingham, K. (1992). The spatial disorientation problem in the united states air force. *Journal of Vestibular Research*, 2(4), 297–306.
- Glize, D., & Laurent, M. (1997). Controlling locomotion during the acceleration phase in sprinting and long jumping. *Journal of Sports Sciences*, 15(2), 181–189.
- Goode, S., & Magill, R. (1986). Contextual interference effects in learning three badminton serves. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 57(4), 308–14.
- Gray, R. (2006). Vision in flying, driving and sports. In I. M. Jenkin, & L. Harris (Eds.) *Seeing Spatial Form*, (pp. 1211–1251). Oxford : Oxford University Press.

BIBLIOGRAPHIE

- Gray, R. (2007). 2D vs. 3D Visual Cues for Altitude Maintenance in Low-Altitude Flight. In *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, vol. 51, (pp. 1287–1290). Human Factors and Ergonomics Society.
- Grosz, J., Rysdyk, R., Bootsma, R., Mulder, J., Van Der Vaart, J., & van Wieringen, P. (1995). Perceptual support for timing of the flare in the landing of an aircraft. In I. P. Hancock, J. Flach, J. Caird, & K. Vicente (Eds.) *Local applications of the ecological approach to human-machine systems*, (pp. 104–121). Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum.
- Hall, K., Domingues, D., & Cavazos, R. (1994). Contextual interference effects with skilled baseball players. *Perceptual and Motor Skills*, 78, 835–841.
- Huet, M., Camachon, C., Fernandez, L., Jacobs, D., & Montagne, G. (2009a). Self-controlled concurrent feedback and the education of attention towards perceptual invariants. *Human Movement Science*, 28(4), 450–467.
- Huet, M., Jacobs, D., Camachon, C., Goulon, C., & Montagne, G. (2009b). Self-controlled concurrent feedback facilitates the learning of the final approach phase in a fixed-base flight simulator. *Human Factors*, 51(6), 858–871.
- Jacobs, D. (2001). *On perceiving, acting and learning, towards an ecological approach anchored in convergence*. Ph.D. thesis, Utrecht : Digital Printing Parterns.
- Jacobs, D., & Michaels, C. (2002). On the apparent paradox of learning and realism. *Ecological Psychology*, 14(3), 127–139.
- Jacobs, D., & Michaels, C. (2006). Lateral interception 1 : operative optical variables, attunement, and calibration. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 32(2), 443–458.
- Jacobs, D., & Michaels, C. (2007). Direct learning. *Ecological Psychology*, 19(4), 321–349.
- Jacobs, D., Michaels, C., & Runeson, S. (2000). Learning to perceive the relative mass of colliding balls : the effects of ratio scaling and feedback. *Perception & Psychophysics*, 62(7), 1332–1340.
- Jacobs, D., Runeson, S., & Michaels, C. (2001). Learning to visually perceive the relative mass of colliding balls in globally and locally constrained task ecologies. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 27(5), 1019–1038.

- Jacobs, D., Silva, P., & Calvo, J. (2009). An empirical illustration and formalization of the theory of direct learning : The muscle-based perception of kinetic properties. *Ecological Psychology, 21* (3), 245–289.
- Janelle, C., Barba, D., Frehlich, S., Tennant, L., & Cauraugh, J. (1997). Maximizing performance feedback effectiveness through videotape replay and a self-controlled learning environment. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 68*(4), 269–279.
- Janelle, C., Kim, J., & Singer, R. (1995). Subject-controlled performance feedback and learning of a closed motor skill. *Perceptual and Motor Skills, 81* (2), 627–634.
- Kaiser, M., & Mowafy, L. (1993). Optical specification of time-to-passage : Observers sensitivity to global tau. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 19*(5), 1028–1040.
- Kleiss, J., & Hubbard, D. (1993). Effects of three types of flight simulator visual scene detail on detection of altitude change. *Human Factors, 35*(4), 653–671.
- Koedijker, J., Oudejans, R., & Beek, P. (2007). Explicit rules and direction of attention in learning and performing the table tennis forehand. *International Journal of Sport Psychology, 38*(2), 227–244.
- Kottke, F., Halpern, D., Easton, J., Ozel, A., & Berrill, C. (1978). The training of coordination. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 59*, 567–572.
- Kraft, C. (1978). A psychophysical contribution to air safety : Simulator studies of visual illusions in night visual approaches. In I. H. L. Pick, H. W. Leibowitz, J. E. Singer, A. Steinschneider, & H. W. Stevenson (Eds.) *Psychology : From Research to Practice*, (pp. 363–385). New York : Plenum Press.
- Kugler, P., & Turvey, M. (1987). *Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement*. Hillsdale, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Langewiesche, W. (1944). *Stick and rudder : an explanation of the art of flying*. New York : McGraw-Hill.
- Larish, J., & Flach, J. (1990). Sources of optical information useful for perception of speed of rectilinear self-motion. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 16* (2), 295–302.
- Laurent, M., Paul, P., & Cavallo, V. (1988). How is gait visually regulated when the head goes faster than the legs. *Journal of Motor Behavior, 20*, 301–316.

BIBLIOGRAPHIE

- Lavery, J. (1962). Retention of simple motor skills as a function of type of knowledge of results. *Canadian Journal of Psychology*, *16*(4), 300–311.
- Lee, D. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, *5*(4), 437–459.
- Lee, D., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception & Psychophysics*, *15*(3), 529–532.
- Lee, D., Lishman, J., & Thomson, J. (1982). Visual regulation of gait in long jumping. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *8*, 448–459.
- Lee, D., & Reddish, P. (1981). Plummeting gannets : a paradigm of ecological optics. *Nature*, *293*, 293–294.
- Lee, T., & Magill, R. (1983). The locus of contextual interference in motor-skill acquisition. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, *9*(4), 730–746.
- Lee, T., White, M., & Carnahan, H. (1990). On the role of knowledge of results in motor learning : Exploring the guidance hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, *22*(2), 191–208.
- Liao, C., & Masters, R. (2001). Analogy Learning : A means to implicit motor learning. *Journal of Sports Sciences*, *19*(5), 307–319.
- Lintern, G. (1980). Transfer of landing skill after training with supplementary visual cues. *Human Factors*, *22*(1), 81–88.
- Lintern, G. (1995). Perceptual learning in the acquisition of flight skills. Tech. rep., Research Institute for the Behavioral and Social Sciences.
- Lintern, G. (2000). An analysis of slant for guidance of landing approaches. *The International Journal of Aviation Psychology*, *10*(4), 363–376.
- Lintern, G., & Koonce, J. (1991). Display magnification for simulated landing approaches. *The International Journal of Aviation Psychology*, *1*(1), 59–72.
- Lintern, G., & Koonce, J. (1992). Visual augmentation and scene detail effects in flight training. *The International Journal of Aviation Psychology*, *2*(4), 281–301.
- Lintern, G., & Liu, Y. (1991). Explicit and implicit horizons for simulated landing approaches. *Human Factors*, *33*(4), 401–417.

- Lintern, G., & Walker, M. (1991). Scene content and runway breadth effects on simulated landing approaches. *The International Journal of Aviation Psychology*, 1(2), 117–132.
- Loomis, J., Blascovich, J., & Beall, A. (1999). Immersive virtual environment technology as a basic research tool in psychology. *Behavior Research Methods Instruments and Computers*, 31(4), 557–564.
- Magill, R. (1998). Knowledge is more than we can talk about : implicit learning in motor skill acquisition. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 69(2), 104–10.
- Magill, R. (2004). *Motor Learning and Control : Concepts and Application*. New York : McGraw- Hill.
- Magill, R., & Hall, K. (1990). A review of the contextual interference effect in motor skill acquisition. *Human Movement Science*, 9(3-5), 241–289.
- Mars, F. (2001). *La désorientation spatiale en aéronautique : Apport des Neurosciences intégratives à la conception des postes de pilotage*. Ph.D. thesis, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille II.
- Masters, R. (1992). Knowledge, knerves and know-how : The role of explicit versus implicit knowledge in the breakdown of a complex motor skill under pressure. *British Journal of Psychology*, 83, 343–358.
- McLeod, P., & Dienes, Z. (1993). Running to catch the ball. *Nature*, 362(6415), 23.
- Mertens, H. (1981). Perception of runway image shape and approach angle magnitude by pilots in simulated night landing approaches. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 52(7), 373–386.
- Mertens, H., & Lewis, M. (1982). Effect of different runway sizes on pilot performance during simulated night landing approaches. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 53(5), 463–471.
- Mertens, H., & Lewis, M. (1983). Effects of approach lighting system and variation in visible runway length on perception of approach angle in simulated night landings. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 54, 500–506.
- Michaels, C., Arzamarski, R., Isenhower, R., & Jacobs, D. (2008). Direct learning in dynamic touch. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 34(4), 944–957.

BIBLIOGRAPHIE

- Michaels, C., & Beek, P. (1995). The state of ecological psychology. *Ecological Psychology*, 7(4), 259–278.
- Michaels, C., & Carello, C. (1981). *Direct Perception*. Englewoods Cliffs, NJ : Prentice-hall.
- Michaels, C., & de Vries, M. (1998). Higher Order and Lower Order Variables in the Visual Perception of Relative Pulling Force. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 24(2), 526–546.
- Michaels, C., Zeinstra, E., & Oudejans, R. (2001). Information and action in timing the punch of a falling ball. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54(A), 69–93.
- Montagne, G., Buekers, M., Camachon, C., de Rugy, A., & Laurent, M. (2003). The learning of goal-directed locomotion : A perception-action perspective. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 56A(3), 551–567.
- Montagne, G., Cornus, S., Glize, D., Quaine, F., & Laurent, M. (2000). A perception-action coupling type of control in long jumping. *Journal of Motor Behavior*, 32(1), 37–43.
- Morice, A., François, M., Jacobs, D., & Montagne, G. (2010). Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Experimental Brain Research*, 202(2), 397–411.
- Morice, A., Siegler, I., Bardy, B., & Warren, W. (2007). Learning new perception-action solutions in virtual ball bouncing. *Experimental Brain Research*, 181(2), 249–265.
- Mulder, M., Pleijsant, J., van der Vaart, H., & van Wieringen, P. (2000). The effects of pictorial detail on the timing of the landing flare : Results of a visual simulation experiment. *International Journal of Aviation Psychology*, 10(3), 291–315.
- Pailhous, J., Ferrandez, A., Flückiger, M., & Baumberger, B. (1990). Unintentional modulations of human gait by optical flow. *Behavioural Brain Research*, 38(3), 275–281.
- Palmisano, S., Favelle, S., & Sachtler, W. (2008). Effects of scenery, lighting, glide-slope, and experience on timing the Landing Flare. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 14(3), 236–246.

- Palmisano, S., & Gillam, B. (2005). Visual perception of touchdown point during simulated landing. *Journal of Experimental Psychology : Applied*, 11(1), 19–32.
- Park, J., Shea, C., & Wright, D. (2000). Reduced-frequency concurrent and terminal feedback : a test of the guidance hypothesis. *Journal of Motor Behavior*, 32(3), 287–296.
- Patterson, R., Geri, G., Dyre, B., Pierce, B., Akhtar, S., Covas, C., & Morgan, W. (2006). Active heading control in simulated flight based on vertically extended contours. *Perception & Psychophysics*, 68(4), 593–600.
- Pigott, R., & Shapiro, D. (1984). Motor schema : the structure of the variability session. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 55, 41–45.
- Proteau, L. (1992). On the specificity of learning and the role of visual information for movement control. *Advances in Psychology*, 85, 67–103.
- Proteau, L., Marteniuk, R., Girouard, Y., & Dugas, C. (1987). On the type of information used to control and learn an aiming movement after moderate and extensive training. *Human Movement Science*, 6(2), 181–199.
- Proteau, L., Marteniuk, R., & Lévesque, L. (1992). A sensorimotor basis for motor learning : Evidence indicating specificity of practice. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 44A(3)(3), 557–575.
- Reuchlin, M. (1977). *Psychologie*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Rieser, J., Pick, H., Ashmead, D., & Garing, A. (1995). Calibration of human locomotion and models of perceptual-motor organization. *Journal of Experimental Psychology : Human Performance and Perception*, 21(3), 480–497.
- Runeson, S. (1995). Support for the cue-heuristic model is based on suboptimal observer performance : Response to Gilden and Proffitt (1994). *Perception & Psychophysics*, 57(8), 1262–1273.
- Salmoni, A., Schmidt, R., & Walter, C. (1984). Knowledge of results and motor learning : a review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin*, 95(3), 355–86.
- Schöllhorn, W. (2000). Applications of systems dynamic principles to technique and strength training. *Acta Academiae Olympicae Estoniae*, 8, 67–85.
- Schöllhorn, W., Beckmann, H., Michelbrink, M., Trockel, M., Sechelmann, M., & Davids, K. (2006). Does noise provide a basis for unifying different motor learning theories. *International Journal of Sport Psychology*, 2(3), 34–42.

BIBLIOGRAPHIE

- Schöllhorn, W., Mayer-Kress, G., Newell, K., & Michelbrink, M. (2009). Time scales of adaptive behavior and motor learning in the presence of stochastic perturbations. *Human Movement Science, 28*(3), 319–333.
- Schmidt, R. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological review, 82*(4), 225–260.
- Schmidt, R. (1993). *Apprentissage moteur et performance*. Paris : Vigot.
- Schmidt, R., & Bjork, R. (1992). New conceptualizations of practice : Common principles in three paradigms suggest new concepts for training. *Psychological Science, 3*(4), 207–217.
- Schmidt, R., Lange, C., & Young, D. (1990). Optimizing summary knowledge of results for skill learning. *Human Movement Science, 9*(3-5), 325–348.
- Schmidt, R., & Lee, T. (2005). *Motor control and learning : A behavioral emphasis*. Champaign, IL : Human Kinetics Publishers.
- Schmidt, R., & Wulf, G. (1997). Continuous concurrent feedback degrades skill learning : Implications for training and simulation. *Human Factors, 39*(4), 509–525.
- Schmidt, R., Young, D., Swinnen, S., & Shapiro, D. (1989). Summary knowledge of results for skill acquisition : support for the guidance hypothesis. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition, 15*(2), 352–359.
- Schneider, W., & Shiffrin, R. (1977). Controlled and automatic human information processing : Detection, search, and attention. *Psychological review, 84*(1), 1.
- Senot, P., Zago, M., Lacquaniti, F., & McIntyre, J. (2005). Anticipating the effects of gravity when intercepting moving objects : Differentiating up and down based on nonvisual cues. *Journal of Neurophysiology, 94*(6), 4471–4480.
- Shea, C., & Wulf, G. (2005). Schema theory : A critical appraisal and reevaluation. *Journal of Motor Behavior, 37*(2), 85–102.
- Shea, J., & Morgan, R. (1979). Contextual interference effects on the acquisition, retention, and transfer of a motor skill. *Journal of Experimental Psychology : Human Learning and Memory, 5*(2), 179–187.
- Shea, J., & Zimny, S. (1983). Context effects in memory and learning movement information. *Advances in Psychology, 12*, 345–366.

- Smith, M., Flach, J., Dittman, S., & Stanard, T. (2001). Monocular optical constraints on collision control. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *27*(2), 395–410.
- Srinivasan, M., Lehrer, M., Kirchner, W., & Zhang, S. (1991). Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees. *Visual Neuroscience*, *6*(05), 519–535.
- Starkes, J., & Ericsson, K. (2003). *Expert performance in sports : Advances in research on sport expertise*. Champaign, IL : Human Kinetics Publishers.
- Swinnen, S., Nicholson, D., Schmidt, R., & Shapiro, D. (1990). Information feedback for skill acquisition : Instantaneous knowledge of results degrades learning. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, *16*(4), 706–716.
- Tarr, M., & Warren, W. (2002). Virtual reality in behavioral neuroscience and beyond. *Nature Neuroscience*, *5*, 1089–1092.
- Temprado, J., & Montagne, G. (2001). *Les coordinations perceptivo-motrices*. Paris : Armand Colin.
- Todorov, E., Shadmehr, R., & Bizzi, E. (1997). Augmented feedback presented in a virtual environment accelerates learning of a difficult motor task. *Journal of Motor Behavior*, *29*(2), 147–158.
- Tremblay, L., & Proteau, L. (1998). Specificity of practice : the case of powerlifting. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, *69*(3), 284–289.
- Tresilian, J. (1999). Visually timed action : time-out for tau. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*(8), 301–310.
- Trowbridge, M., & Cason, H. (1932). An experimental study of Thorndike's theory of learning. *The Journal of General Psychology*, *7*(2), 245–260.
- Turvey, M., Burton, G., Amazeen, E., Butwill, M., & Carello, C. (1998). Perceiving the width and height of a hand-held object by dynamic touch. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *24*, 35–48.
- van Rossum, J. (1990). Schmidt's schema theory : the empirical base of the variability of practice hypothesis : A critical analysis. *Human Movement Science*, *9*(3-5), 387–435.

BIBLIOGRAPHIE

- Vander Linden, D., Cauraugh, J., & Greene, T. (1993). The effect of frequency of kinetic feedback on learning an isometric force production task in nondisabled subjects. *Physical Therapy, 73*(2), 79–87.
- Vereijken, B., & Whiting, H. (1990). In defence of discovery learning. *Canadian Journal of Sport Sciences, 15*(2), 99–106.
- Warren, W. (1984). Perceiving affordances : Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 10*(5), 683–703.
- Warren, W. (1988). Action modes and laws of control for the visual guidance of action. *Advances in Psychology, 50*, 339–379.
- Warren, W. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychological Review, 113*(2), 358–389.
- Warren, W., Kay, B., Zosh, W., Duchon, A., & Sahuc, S. (2001). Optic flow is used to control human walking. *Nature Neuroscience, 4*(2), 213–216.
- Warren, W., Morris, M., & Kalish, M. (1988). Perception of translational heading from optical flow. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 14*(4), 646–660.
- Watson, D. (1992). Visual dominance can lead to illusions and disorientation. *Civil Aviation Authority (CAA) Australia, Aviation Bulletin, 2*.
- Wiener, E. (1988). *Human factors in aviation*. New York : Academic Press.
- Williams, A., Ward, P., Knowles, J., & Smeeton, N. (2002). Anticipation skill in a real-world task : measurement, training, and transfer in tennis. *Journal of Experimental Psychology : Applied, 8*(4), 259–270.
- Wilson, D. (1999). Darkness increases risks of flight. *Human Factors & Aviation Medicine, 46*(6), 3–8.
- Winstein, C., & Schmidt, R. (1990). Reduced frequency of knowledge of results enhances motor skill learning. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition, 16*(4), 677–691.
- Wulf, G. (2007). *Attention and motor skill learning*. Champaign, IL : Human Kinetics Publishers.

- Wulf, G., & Lee, T. (1993). Contextual interference in movements of the same class : Differential effects on program and parameter learning. *Journal of Motor Behavior*, 25(4), 254–263.
- Wulf, G., & Toole, T. (1999). Physical assistance devices in complex motor skill learning : benefits of a self-controlled practice schedule. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70(3), 265–72.

Apprentissage et atterrissage : Comment éduquer la perception des pilotes ?

Résumé :

L'objectif principal de ce travail était d'étudier les mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent l'apprentissage d'une tâche complexe. L'exemple choisi dans le présent manuscrit est celui de l'atterrissage et plus particulièrement de la phase d'approche d'un avion vers la piste. Cette manœuvre est une phase de vol critique qui nécessite de nombreuses heures de formation et d'entraînement. Notre objectif était donc d'étudier, en s'appuyant sur l'approche écologique de la perception et de l'action, les différents moyens permettant de faciliter l'apprentissage de la phase d'approche. La première partie de ce travail détaille les différents aspects techniques permettant d'appréhender la procédure d'atterrissage puis dresse l'état actuel des connaissances sur la conception écologique de l'apprentissage. La partie centrale de cette thèse constitue le socle de notre démarche expérimentale et repose sur l'utilisation de la réalité virtuelle. Les manipulations effectuées pour améliorer l'apprentissage de la phase d'approche consistaient dans un premier temps, à ajouter une information artificielle dans l'environnement virtuel (Expériences 1 et 2) afin de faciliter la détection des informations utiles au contrôle de l'action. Les résultats de ces premières études montrent que l'apprentissage peut être amélioré à condition d'afficher l'information artificielle à la demande de l'apprenant. Par ailleurs, des tests de transferts réalisés à la fin de l'expérience 2 révèlent aussi que les participants apprennent à utiliser des informations visuelles différentes. L'objectif de notre dernière expérience (Expérience 3) était donc de manipuler l'aménagement des conditions de pratique pour éduquer l'attention de l'apprenant vers une information particulière, choisie par l'expérimentateur. Pris dans leur ensemble, ces résultats permettent de discuter des différents processus qui sous-tendent l'acquisition d'une nouvelle habileté perceptivo-motrice. La discussion générale de ce travail évoque notamment les conséquences des différentes manipulations effectuées au cours des trois chapitres expérimentaux sur le mécanisme d'éducation de l'attention et discute du rôle des différentes informations utilisées par les apprenants. Enfin, nous suggérons quelques pistes pratiques en relation avec le domaine de la formation des pilotes pour traduire de façon appliquée les résultats obtenus lors de ce travail.

Mots clés : Apprentissage, Approche écologique, Éducation de l'attention, Formation, Atterrissage, Aéronautique.

Learning and landing : How to educate pilot's perception ?

Abstract :

The main objective of this work was to study perceptual-motor mechanisms underlying the learning of a complex task. The task chosen concerns the particular phase of plane landing called the approach phase. This maneuver is a critical phase of flight and requires many hours of training. Our aim was to study ways to facilitate the learning of the approach phase from an ecological approach to perception and action. The first part of this work details the technical aspects involved in understanding the landing procedure and describes the current state of knowledge on the ecological approach of learning. The second part of this thesis is the foundation of our experimental work which was based on the use of virtual reality. In order to improve the learning of the approach phase, the manipulation consisted of adding artificial information in the virtual environment (Experiment 1 and 2) which facilitated the detection of useful information to control action. The results of these studies show that learning can be improved if artificial information display is self-controlled by the participant. In addition, transfer tests performed at the end of Experiment 2 revealed that the participants came to rely on different visual information. The aim of our last experiment (Experiment 3) was to vary the practice conditions in order to educate the attention of the participants towards specific information, selected by the experimenter. In sum, these results allow us to discuss the different processes underlying the acquisition of a new perceptual-motor skill. In the general discussion we refer to the consequences of the various operations performed during the three experimental chapters on the mechanism of education of attention and discuss the role of the various information used by the participants. Finally, we suggest several practical applications potentially useful for the improvement of pilots training.

Keywords : Learning, Ecological Psychology, Education of attention, Training, Landing, Aeronautics.

Ce manuscrit a été composé avec le logiciel de composition typographique L^AT_EX