



UNIVERSITE D'AIX-MARSEILLE

ED 463 - Sciences du Mouvement Humain

Faculté des Sciences du Sport

Institut des Sciences du Mouvement E.-J. Marey. UMR 7287 CNRS & AMU

Thèse présentée pour obtenir le grade universitaire de docteur

Discipline : Sciences du Mouvement Humain

Spécialité : Contrôle Perceptivo-Moteur et Apprentissage

Simon LEDOUIT

Modélisation des relations information-mouvement mises en
œuvre lors de l'interception d'un mobile

Soutenue le 10/12/2015 devant le jury :

Reinoud	BOOTSMA	Aix-Marseille Université	Directeur de thèse
Frank	ZAAL	University of Groningen	Co-directeur
Cathy	CRAIG	Queen's University	Rapporteur
Charalambos	PAPAXANTHIS	Université de Bourgogne	Rapporteur
Nicolas	BENGUIGUI	Université de Caen	Examineur
David	JACOBS	Universidad de Madrid	Examineur
Rémy	CASANOVA	Aix-Marseille Université	Co-encadrant (invité)

Résumé

L'objectif de cette thèse est de comprendre le comportement cinématique d'interception latérale manuelle et locomotrice. Dans l'introduction nous montrons que l'étude du mouvement d'interception peut être engagée avec les concepts de la perception directe et du couplage perception-action (contrôle continu du mouvement). De nombreux travaux ont en effet montré qu'une stratégie prospective (par opposition à prédictive) serait mise en œuvre pour intercepter un mobile mais un débat existe quant à la double question (i) quelle information est utilisée pour réguler le mouvement ? (ii) comment est utilisée cette information ? Pour répondre nous avons utilisé la réalité virtuelle comme méthodologie générale. Dans le premier chapitre expérimental (tâche d'interception latérale manuelle de trajectoires rectilignes) nous montrons que les variables environnementales qui ont émergées de la littérature ne peuvent expliquer seules les régulations du mouvement d'interception. Dans le deuxième chapitre expérimental (tâche similaire à la première étude) nous proposons qu'une variable d'ordre intermédiaire plutôt qu'entier pourrait guider le mouvement. Enfin dans le troisième chapitre expérimental (tâche d'interception latérale locomotrice de trajectoires rectilignes et curvilignes) nous apportons des éléments de preuve en faveur du concept d'information d'ordre fractionnaire qui augmenterait au cours de l'action. Nous développons dans ces deux dernières études deux modèles dynamiques (pour l'interception manuelle et locomotrice, respectivement) qui nous permettent de simuler de façon satisfaisante le comportement cinématique d'interception latérale pour une situation donnée. Plus généralement, nous suggérons, quant à l'ensemble des modèles dynamiques formalisant les interactions perception-action, que cette proposition conceptuelle pourrait permettre de plus larges avancées encore si l'on considérait désormais l'éventuelle sensibilité des différents organismes vivants aux informations d'ordre intermédiaire plutôt que nécessairement entier.

Mots clés: humain, perception-action, mouvement, information, interception, ordre fractionnaire, modèle, dynamique.

Remerciements

Je veux en premier lieu remercier mes directeurs de thèse : Reinoud Bootsma et Frank Zaal.

Merci à Reinoud Bootsma. Quel heureux hasard d'avoir candidaté en 2009, en première année de Master, pour ce stage sur l'effet de la texture de balle sur le comportement d'interception, et commencer alors à découvrir le monde de la Science à ses côtés ! Je lui dois bien plus que ce grade de docteur de l'Université Aix-Marseille. Le travail avec Frank Zaal, durant deux séjours trimestriels à Groningen aux Pays-Bas, et plus encore au fil de ces quatre années, s'est révélé être d'une grande richesse scientifique et pédagogique.

Je mesure aussi la dynamique qu'a pu prendre cette thèse grâce à l'implication de Rémy Casanova. Travailler à ses côtés a constitué une aide précieuse sans laquelle beaucoup de choses n'auraient pas été possible.

Un grand merci à eux trois.

Je veux exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury d'avoir accepté de participer à l'expertise de ce travail de thèse.

Je me dois de remercier Eric Berton, doyen de la Faculté des Sciences du Sport et directeur de l'Institut des Sciences du Mouvement E.-J. marey, ainsi que Gilles Montagne, directeur de l'équipe dans laquelle j'ai pris place pendant ces quatre années de thèse.

Je remercie aussi les membres du laboratoire qui m'ont, à différents niveaux, beaucoup apporté: Laure, Lionel, Fabrice, Jocelyn, Jorge, Nathalie F, Bernadette, Mireille et Nathalie R.

Cette thèse a aussi permis d'heureuses rencontres, dans l'ordre chronologique: Colas, Enora, Nicolas, Cécile, Hugo, Numa, Sophie, Olivier, Geoffrey, Hannah, Niek, Caroline, Manon, Carlijn, Charlotte JDN, Gwenaëlle et Maxime. Je remercie tout particulièrement les camarades doctorants avec qui j'ai passé de très bon moments, notamment grâce à l'Association DocSMH que j'ai eu la chance de présider pendant presque trois ans: Noémie, Guillaume, Patrick, Benjamin, Julie, Mathieu, Charlotte R, Thomas et Martin.

Merci à Solveig.

Merci aux amis, Brice et Claire, Florent, Fred et bien sûr Antoine, Loïc et Thibaut.

Enfin et sans plus attendre, je remercie ma famille ; mes parents, Yoann, Lisa, dont le soutien s'est étendu bien au-delà de ces années de thèse.

Table des matières

Résumé	3
Remerciements	4
Table des matières	5
Avant-propos	7
Introduction	8
1. Cadre théorique	11
1.1. Approche écologique de la perception et de l'action	11
1.1.1. Limites d'une théorie de l'information sans action	11
1.1.2. La notion d'information selon la théorie de la perception directe	12
1.1.3. Le couplage perception-action	15
1.2. Les lois de contrôle	17
1.3. Objectifs de ce travail	21
2. Modélisation des relations information-mouvement mises en œuvre lors de l'interception d'un mobile	23
2.1. Variables SAE et variables optiques pour modéliser l'interception	26
2.1.1. Variables SAE	26
2.1.2. Variables optiques	29
2.2. Modélisation de l'interception manuelle latérale	32
2.2.1. Peper <i>et al.</i> (1994) : le modèle de Vitesse Requisite	32
2.2.2. Bootsma <i>et al.</i> (1997) : amélioration du modèle de Peper <i>et al.</i> (1994)	33
2.2.3. Dessing <i>et al.</i> (2002) : le modèle $(R)(R)VITE$	35
2.2.4. Jacobs et Michaels (2006) : discussion du modèle de Bootsma <i>et al.</i> (1997)	37
2.2.5. Michaels <i>et al.</i> (2006) : réemploi du modèle <i>VITE</i>	40
2.2.6. Dessing et Craig (2010) : retour au modèle de Vitesse Requisite	41
2.3. Modélisation de l'interception locomotrice	43
2.3.1. Déplacements libres dans un plan	43
2.3.2. Déplacements contraints sur un axe	47

2.4. Compendium	52
3. Méthodologie générale	55
3.1. Présentation des dispositifs expérimentaux	55
3.1.1. La Tâche d'interception manuelle (chapitres expérimentaux 4 et 5)	55
3.1.2. La Tâche d'interception locomotrice (chapitre expérimental 6)	56
3.2. Scénarii expérimentaux	58
3.3. Acquisition et analyse des données	58
4. L'effet persistant de l'angle d'approche	59
4.1. Positionnement de l'étude	59
4.2. Manuscrit de l'étude	60
5. Interception latérale manuelle : Vers un contrôle basé sur une variable d'ordre intermédiaire	84
5.1. Positionnement de l'étude	84
5.2. Manuscrit de l'étude	85
6. Une information d'ordre fractionnaire dans le contrôle visuel de l'interception locomotrice latérale	111
6.1. Positionnement de l'étude	111
6.2. Manuscrit de l'étude	112
7. Discussion générale	135
7.1. Interception latérale manuelle	135
7.1.1. Rappel des principaux résultats	136
7.1.2. Discussion	138
7.2. Interception latérale locomotrice	145
7.2.1. Rappel des principaux résultats	145
7.2.2. Discussion	146
7.3. Synthèse	150
Conclusion	153
Bibliographie	154

Avant-propos

Durant ce travail de thèse, deux articles ont été soumis dans des revues internationales. Ces travaux seront présentés dans les chapitres 4 et 6 constituant deux des trois parties expérimentales de la thèse. Une troisième étude est développée dans le chapitre 5, mais la version présentée n'est que préliminaire.

Article 1. (publié)

Ledouit, S., Casanova, R., Zaal, F. T. J. M., Bootsma, R. J. (2013) Prospective Control in Catching: The Persistent Angle-of-Approach Effect in Lateral Interception.

PLoS ONE 8(11): e80827.

doi:10.1371/journal.pone.0080827

Article 2. (sous presse)

Bootsma, R. J., Ledouit, S., Casanova, R., Zaal F. T. J. M. (2015) Fractional-Order Information in the Visual Control of Lateral Locomotor Interception.

Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance.

doi:10.1037/xhp.0000162

Introduction

L'Homme et une très grande partie des organismes vivants qui peuplent notre planète ont une caractéristique commune qui est la capacité de se mouvoir, de se déplacer. Des stratégies perceptives et motrices sont ainsi mises en œuvre par une grande diversité d'espèces animales pour réaliser des mouvements de déplacement. Différents systèmes se sont développées au cours de l'évolution de ces espèces afin de permettre une relation fiable avec l'environnement et assurer ainsi leur survie. Malgré la multitude des systèmes perceptifs et locomoteurs répertoriés aujourd'hui dans le monde du vivant, il ne semble pas que la même diversité ait été observée quant aux modes de contrôle des déplacements. Des espèces très différentes semblent utiliser des stratégies perceptivo-motrices très proches afin d'agir dans notre environnement (Srinivasan, 1998).

L'action de se déplacer peut se décliner en deux modalités : l'évitement et l'atteinte. La modalité d'évitement (d'obstacles mobiles ou fixes) permet de se rendre d'un point A à un point B sans collision et ainsi interagir avec le monde environnant de façon sûre. Lorsque l'Homme se déplace au moyen de véhicules motorisés, il devient vital que les stratégies comportementales utilisées soient efficaces. Mais les modes de contrôle permettant l'évitement semble offrir des solutions comportementales plus variées que celles relatives à l'atteinte d'objets fixes ou à l'interception de mobiles. En effet, lorsque vous marchez sur la voie publique, une des conditions est de ne pas entrer en collision avec les obstacles ou les personnes qui vous entourent. Pour ce faire, plusieurs comportements s'offrent à vous si une de ces personnes se déplace dans votre direction : vous pouvez vous immobiliser, opérer un déplacement vers la gauche, vers la droite, vous pouvez même revenir sur vos pas. La pluralité de ces solutions comportementales d'évitement augmente la difficulté d'étudier les modes de contrôle perceptivo-moteurs sous-tendants. A contrario, l'atteinte d'un objet fixe requiert d'arriver au bon endroit pour réussir la tâche. Plus encore, l'interception d'un mobile nécessite de se trouver au bon endroit au bon moment pour attraper l'objet en mouvement. Ces deux conditions augmentent la sévérité des contraintes d'un agent dans son environnement, et tendent à

réduire considérablement le nombre de solutions comportementales possibles. Ceci constitue un premier argument fort en faveur du paradigme fourni par l'étude du mouvement d'interception pour comprendre le contrôle de l'action par le système visuel. L'interception d'un mobile n'est en aucun cas une action de déplacement propre à l'Homme : la dialectique prédateur-proie, omniprésente dans le monde du vivant, en est un exemple frappant. Pour un très grand nombre d'espèces animales, la réussite fréquente d'une tâche d'interception, être au bon endroit au bon moment pour saisir la proie, revêt d'une importance vitale. Mais ces actions de chasse, faisant interagir dans un environnement changeant un prédateur et une proie, se déroule dans un plan multidimensionnel. La multiplication des directions de déplacement des agents accentue la complexité de la compréhension des mécanismes perceptivo-moteurs mis en œuvre. Une espèce animale peut être contrainte à se déplacer sur axe pour intercepter un mobile : l'Homme. Ainsi, l'interception latérale d'un mobile sphérique par le système humain semble être un objet d'étude pertinent pour tenter de comprendre quelles stratégies perceptivo-motrices sont utilisées pour agir de façon fiable et efficiente dans l'environnement.

Pour cela, nous commencerons par poser le cadre théorique dans lequel ce travail de thèse s'est inscrit, et nous détaillerons les objectifs fixés (Chapitre 1). La modélisation d'un phénomène étudié est nécessaire pour répondre à une problématique en double hypothèse : (a) quelle information guide le mouvement ? (b) comment est utilisée cette information ? Ce chapitre permettra de définir deux voies possibles pour formaliser ces interactions agent-environnement : le développement de modèles conceptuels construits sur l'idée de l'existence de modèles internes aux espèces vivantes ; la construction de modèles dynamiques permettant de générer un comportement cinématique à partir d'une situation environnementale particulière. Pour justifier notre choix de nous diriger vers l'élaboration d'un modèle dynamique, nous aborderons la théorie de la perception directe s'inscrivant dans le cadre de l'approche écologique. Cette théorie se développe autour de l'idée d'un couplage perception-action dans l'interaction d'un organisme vivant avec son environnement. Le potentiel explicatif de cette approche nous amènera à discuter la notion d'information visuelle utilisée dans le cadre de ce couplage perception-action. Nous ferons alors un état de la littérature des différents modèles qui ont été proposés pour formaliser les stratégies perceptivo-motrices engagées lors de l'interception d'un mobile. Cette étape nous amènera à formuler nos

hypothèses concernant les variables informationnelles susceptibles de guider les régulations du mouvement d'interception (Chapitre 2). Pour apporter des éléments de preuve soutenant ces hypothèses, la méthodologie expérimentale utilisée a été la réalité virtuelle. Cet outil permettant un contrôle expérimental élevé (liberté expérimentale et possibilité de confronter les participants aux mêmes conditions environnementales prédéfinies), nous avons choisi de réaliser les trois études expérimentales en réalité virtuelle. Aussi cette méthodologie permet de conserver le caractère dynamique du système agent-environnement en enregistrant simultanément les contraintes perçues par le participant et son comportement cinématique (Chapitre 3).

Les trois chapitres suivants constitueront le corps expérimental de cette thèse. Nous y développerons les résultats obtenus et leurs interprétations. La première étude, regroupant quatre expériences, a permis de montrer que l'état de la littérature scientifique quant aux variables environnementales susceptibles d'expliquer les régulations continues de nos mouvements lors d'une tâche d'interception n'étaient pas complètement satisfaisantes (Chapitre 4). Avec la deuxième étude (Chapitre 5), nous introduirons la notion de variable d'ordre intermédiaire (par opposition aux variables d'ordre entier), qui nous a permis d'expliquer de nombreux comportements caractéristiques des mouvements d'interception : les différences dans les temps d'initiation du mouvement, l'effet systématique de l'angle d'approche de la trajectoire lorsque celle-ci est rectiligne, et l'observation non systématique de mouvements de rebroussement. La dernière expérience (Chapitre 6) nous a permis de développer ce nouveau concept en sciences du mouvement humain et d'y ajouter l'idée d'une information qui s'enrichirait au cours du temps : une information visuelle dont l'ordre augmenterait de façon fractionnaire.

Enfin, le dernier chapitre constituera la discussion générale (Chapitre 7). Ce chapitre permettra de lier directement les questions initiales posées, les résultats expérimentaux obtenus et les réponses développées. Nous y détaillerons aussi les forces et les limites de ce travail. Nous synthétiserons enfin les points importants de ce travail de thèse et nous mentionnerons quelles perspectives il semble préfigurer, et nous concluons.

1. Cadre théorique

La modélisation des relations information-mouvement mises en œuvre lors de l'interception d'un objet en approche est un projet de recherche qui doit s'insérer dans un cadre théorique précis. Nous développerons dans ce premier chapitre les motivations conceptuelles qui nous ont amené à inscrire ce travail dans le cadre de l'approche écologique de la perception et de l'action.

1.1.Approche écologique de la perception et de l'action

1.1.1. Limites d'une théorie de l'information sans action

La littérature montre différentes conceptions de la nature informationnelle de l'environnement dans lequel tout organisme vivant évolue. L'une d'entre elles, largement répandue, considère que l'environnement est pauvre d'un point de vue informationnel. Alors, une action adaptée nécessitera l'enrichissement de cet environnement par un traitement de l'information. Les approches s'inscrivant dans ces considérations théoriques de la perception et de l'action définissent le système cognitif d'un organisme vivant comme un système de traitement de l'information (Shannon, 1948). Cette conception suggère en effet la détection de stimuli pauvres mais enrichis par le traitement cognitif (Fodor, 1983). Les travaux qui ont été entrepris selon cette théorie ont abouti à une conceptualisation de l'exécution de l'action en différents niveaux : détection des informations environnementales pertinentes ; appel à des représentations internes construites antérieurement; prise de décision ; préparation de l'action ; et exécution motrice de l'action. Ainsi une des limites de ces théories dites représentationnelles est qu'elles s'attachent à l'étude du traitement de l'information et

de sa communication plus qu'à la nature de l'information responsable des régulations de l'action. Aussi, elles sous-entendent la nécessité de créer ces représentations internes et leur utilisation dans un temps raisonnable pour permettre un comportement efficient. Ce type de conception de la notion d'information conduit finalement à un paradigme théorique de séparation fonctionnelle de la perception et de l'action que l'on nomme représentationnel relativement à la cognition (Neisser, 1967).

De façon dialectique, a émergé la théorie de la perception directe (Gibson, 1986 ; Turvey, 1977 ; Michaels et Carello, 1981) qui prône donc que l'environnement est riche d'un point de vue informationnel. Cette théorie ne cloisonne pas la perception et l'action, et postule que la compréhension du mouvement et de l'information détectée passe par l'étude de son couplage.

1.1.2. La notion d'information selon la théorie de la perception directe

La théorie de la perception directe est centrale dans l'approche écologique de la perception et de l'action. Selon le récit de Bootsma (1998), s'il est difficile de dater la naissance de cette approche, certains indices ont permis d'identifier les éléments marquants de son avènement. Ainsi en 1977, l'athlète anglais Michael Turvey émigré aux Etats-Unis proclama le mariage des idées fondamentales du physiologiste russe Nicolai Alexandrovitch Bernstein (1896-1966) et celles du psychologue américain James Jerome Gibson (1904-1979). La quête de ce dernier était de démontrer la puissance explicative du concept de perception directe pour comprendre l'organisation de l'action, alors que Bernstein mena de nombreux combats pour fermer l'arc stimulus-réponse cher aux approches dites « classiques » mentionnées précédemment.

En premier lieu, la théorie de la perception directe prône l'étude de l'interaction entre l'agent et l'environnement. L'étude de l'agent isolé relèverait de la physiologie, celle de l'environnement de la physique. La psychologie écologique est un champ scientifique qui s'applique à étudier l'interaction des organismes vivants avec leur environnement. Un des premiers postulats de cette théorie est la possibilité de percevoir sans la nécessité de recourir à des représentations internes de la situation élaborées en amont. Gibson (1977, 1986) a fait l'hypothèse d'un environnement riche du point de vue du contenu

informationnel^a. Pour soutenir son discours, il a développé le concept de configuration optique (*optical array*), portée par la lumière ambiante (*ambient light*) révélant la structure de l'environnement. L'ensemble de rayons lumineux réfléchis par les surfaces qui composent l'environnement se croisent au point d'observation d'un agent présent, ou de tout autre système perceptif capable de capter la lumière. Ces rayons lumineux renvoient une configuration optique spécifique de l'environnement. L'environnement se reflète donc dans la lumière ambiante, et un agent immergé dans ce bain de lumière rencontrera une configuration optique spécifique à son point d'observation. Il a opposé ce concept à celui d'image rétinienne (points lumineux stimulant les récepteurs rétiniens). Sans dire bien évidemment que la stimulation des récepteurs photosensibles n'est pas nécessaire, il suggérerait qu'elle ne constitue pas en elle seule la source de la perception visuelle. Selon lui, les rayons lumineux sont des stimuli sur la rétine, et leur structuration globale est l'information pour l'agent. La lumière ambiante est porteuse d'information par son organisation reflétant la structure de l'environnement. Gibson (1986) illustre son explication avec l'exemple d'un agent évoluant dans un brouillard épais. Une lumière ambiante stimule la rétine, mais l'homogénéité des rayons lumineux ne révèle aucune structure de l'environnement, et il n'y a donc aucun contenu informationnel pour l'agent. Selon la théorie de la perception directe, la notion de structure de l'environnement et donc de lumière ambiante est au centre de la définition de l'information. La configuration optique est structurée par les propriétés de l'environnement, elle est riche en contenu informationnel. Il n'est alors pas nécessaire de faire intervenir des représentations internes pour accéder aux propriétés utiles de cet environnement pour y agir de façon efficace. Michaels & Carello (1981) ont résumé cette conceptualisation de la perception visuelle comme suit :

"[...] as Gibson uses the term, information is structure that specifies an environment to an animal. It is carried by higher-order patterns of stimulation-neither points of light nor collections of such points (images)-but, rather, complex structures often given over time. These patterns are information about the world." (p. 9)

^a Le contenu informationnel peut être de nature diverse (acoustique, chimique, optique etc.) Cette thèse se concentrera sur l'étude des variables optiques pour comprendre les relations information-mouvement mises en œuvre lors de l'interception d'un mobile.

Gibson a apposé un autre concept fort pour hisser la théorie de la perception directe comme véritable alternative aux théories représentationnelles, le concept de flux optique. Le flux optique reflète les changements de la configuration optique spécifique au point d'observation de l'agent. Il résulte de mouvements de l'agent et/ou de changements dans l'environnement. Deux types de flux optique doivent en effet être distingués : le flux local et le flux global. Un flux local renvoie à des variations de la configuration optique dues à des changements dans l'environnement (éléments dynamiques tels qu'un oiseau qui vole, un bateau qui navigue ou un mobile à intercepter). Un flux global renvoie à des variations de la configuration optique dues au mouvement du point d'observation de l'agent dans l'environnement, environnement qui peut contenir des éléments dynamiques. Le concept de flux global intègre donc celui de flux local. Malgré ces changements de la configuration optique, dont résulte le flux optique, des relations entre les éléments constitutifs de ce flux vont persister, et ce sont ces relations qui vont constituer le contenu informationnel de l'environnement ; il s'agit du concept d'invariant. Deux types d'invariants peuvent là encore être distingués : structurels ou transformationnels. Si la configuration optique est statique, il est impossible d'accéder aux propriétés structurelles de l'environnement (concept sur lequel sont basées de nombreuses illusions optiques qui ne fonctionnent que pour une configuration optique donnée). En revanche, des changements dans la configuration optique vont faire émerger des relations invariantes car persistantes entre les éléments qui la constitue. Les invariants structurels spécifient ce qui est contenu dans l'environnement. Johansson (1973) a apporté un exemple du caractère informationnel des invariants structurels en plaçant des points lumineux sur les articulations d'un individu vêtu exclusivement en noir. Il a montré que la mise en mouvement de l'individu laissait apparaître des relations invariantes entre certains points lumineux permettant la perception de la structure qui les supportait: un système humain. Mais ces points lumineux sur un individu en mouvement montrent aussi des relations invariantes transformationnelles qui permettent de spécifier qu'il s'agit d'un système humain (invariant structurel) en train de marcher (invariant transformationnel). Plus encore, Turvey (1977) a démontré que des invariants transformationnels permettaient de savoir si un objet se rapproche de nous ou si nous nous rapprochons de lui. L'approche vers un objet suscitera l'expansion optique de tous les objets contenus dans l'environnement. Si en revanche c'est l'objet qui se rapproche, les seules variations du

flux seront l'expansion optique de celui-ci. Ces invariants révèlent donc les caractéristiques de l'environnement à partir d'un flux optique local (sans mouvement du point d'observation) ou global (avec mouvement du point d'observation).

Finalement, dans le cadre de la théorie de la perception directe, l'information est considérée comme accessible à partir des invariants structurels et transformationnels du flux optique généré par l'environnement. Et, le déplacement du point d'observation de l'agent dans cet environnement fait émerger des invariants dans un flux optique global permettant l'accès aux propriétés du système agent-environnement, et non pas seulement aux propriétés de l'environnement. La perception est alors directement liée à l'action. Le concept de perception directe s'affranchit des contraintes conceptuelles des théories représentationnelles en postulant la disponibilité du contenu informationnel relatif à l'environnement (par opposition au traitement nécessaire de l'information proposé par les théories représentationnelles). Aussi, la théorie de la perception directe ne postule pas la nécessité de faire intervenir la notion de représentations de l'environnement afin de pouvoir agir.

1.1.3. Le couplage perception-action

L'approche écologique se distingue des autres approches en postulant que notre environnement est riche en information et permet directement le contrôle de l'action. Un des fondements de cette approche est de considérer que l'agent (l'organisme vivant) et l'environnement forment un système : le système agent-environnement (SAE). Le contenu informationnel de l'environnement se caractérise par des variables informationnelles qui spécifient les propriétés SAE (voir *Figure 1.1.3.a*). Ces propriétés SAE peuvent être décrites par des variables SAE. Et c'est la perception de ces variables SAE qui va permettre l'action. Cette distinction entre variables informationnelles et variables SAE est essentielle. Les premières révèlent la structure de l'environnement (changeante ou non). Elles sont indépendantes de la présence d'un agent mais, lorsque agent il y a, elles spécifient les secondes qui sont les propriétés SAE alors constituées. Les changements d'état du système (mouvement propre d'éléments de l'environnement et/ou de l'agent dans celui-ci) laissent émerger des invariants. Leur détection permettra d'accéder aux propriétés du système et ainsi d'agir de façon efficace. Les mouvements

gènereront à nouveau des changements d'état du système, il s'agit ainsi véritablement d'une relation circulaire entre la perception et l'action.

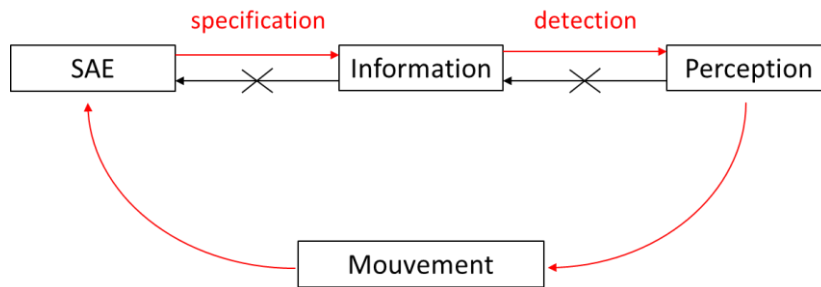


Figure 1.1.3.a : Représentation des relations information, perception et mouvement (Bootsma, 1998)

Ce couplage perception-action est central dans l'approche écologique. C'est sur cette base de réflexion que nos travaux vont être réalisés, afin de comprendre les relations existantes entre les informations disponibles dans l'environnement et les mouvements caractéristiques opérés pour des tâches d'interception d'un mobile en approche. Deux niveaux d'analyse ont été définis pour comprendre les déterminants du couplage perception-action (voir *Figure 1.1.3.b*): (i) la relation information-mouvement situe l'analyse à un niveau fonctionnel du couplage perception-action, permettant d'étudier les relations directes entre les variables informationnelles/SAE et l'agent ; (ii) la relation perception-actuation situe l'analyse du couplage à un niveau d'implémentation, prenant en compte les contraintes neurophysiologiques et biomécaniques de l'agent. Cette thèse se développera selon un niveau d'analyse fonctionnel, précisément autour de la question des variables optiques utilisées pour guider les mouvements d'interception, et comment celles-ci seraient utilisées par l'agent.

Nous venons de définir les notions sur lesquelles ce travail de thèse s'est construit. En effet, nous avons expliqué comment s'articulaient les concepts propres à l'approche écologique et où nous situons ce travail. Mais nous n'avons pas encore abordé les moyens que cette approche a développé pour formaliser le contrôle de l'action par l'agent dans la logique de ce couplage perception-action. La formalisation des relations entre l'information et le mouvement a été rendu possible par le développement du concept de loi de contrôle.

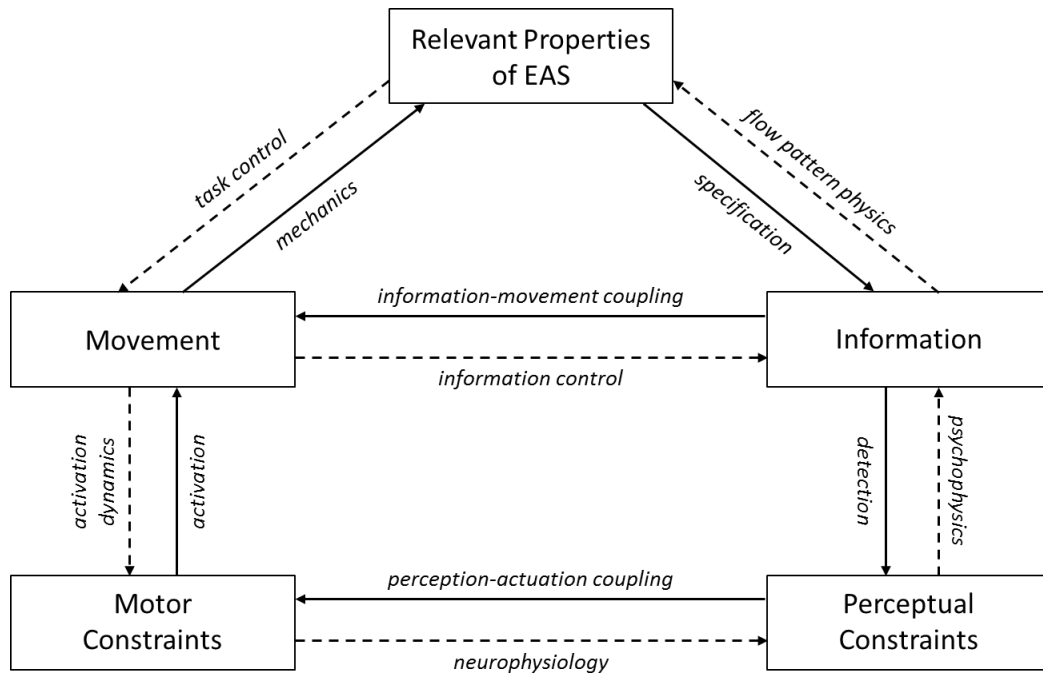


Figure 1.1.3.b : Représentation des deux niveaux d'analyse du couplage perception-action. (Bootsma, 1998).

1.2. Les lois de contrôle

Warren (1988) a proposé la notion de loi de contrôle pour formaliser les relations information-mouvement. Une loi de contrôle représente une description formelle du couplage perception-action. L'avancée permise par les lois de contrôle réside dans le fait qu'elles ont rendu possible la modélisation de l'interaction agent-environnement et ce pour des êtres vivants de nature très diverse (Duchon & Warren, 1994 ; Srinivasan, 1998). Warren (1988) définit pour cela des lois d'optique écologique (production d'un flux optique par le mouvement de l'agent, Eq. 1.2.a) ainsi que des lois de spécification (la résultante des forces exercées et subies par l'agent en fonction du flux optique, Eq. 1.2.b).

$$Flux = f(Force) \quad (1.2.a)$$

$$Force = g(Flux) \quad (1.2.b)$$

Les forces exercées sur l'organisme vivant sont d'origine interne, pour la production des forces générant son mouvement (déplacement du point d'observation), et externe, pour

les forces subies (réaction du sol pour la marche, flottaison grâce à l'eau pour nager etc.). Une loi de contrôle se définit alors comme la relation entre un différentiel de production de force par l'agent et un différentiel d'information perçue (Eq. 1.2.c).

$$\Delta F_{int} = g(\Delta Flux) \quad (1.2.c)$$

Ce type de formalisation permet de mettre en relation explicitement la production de mouvement et une information contenue dans le flux optique. Warren (1988) a proposé un exemple précis pour illustrer le concept de loi de contrôle. Il a étudié la locomotion de course et plus particulièrement le contrôle de la longueur de la foulée (Warren *et al.*, 1986). En s'intéressant aux deux variables que représentent la longueur de la foulée et la vitesse de déplacement, il a suggéré que pour un déplacement à vitesse constante le paramètre physique déterminant de la longueur de foulée était le temps de vol entre deux poses de pied (Δt). Il a aussi noté que le temps de vol dépend de l'impulsion verticale produite par le coureur (I). Ainsi le contrôle de la longueur de la foulée peut être explicité par la relation directe entre l'impulsion verticale I (le paramètre moteur) et le temps désiré entre deux poses de pied Δt (le paramètre informationnel). Δt n'est pas l'information en soi, mais l'agent peut accéder au temps désiré grâce à la variable optique τ (Lee, 1976). Cette variable optique est l'inverse du taux de dilatation optique de la cible (ici la cible est l'emplacement de la prochaine pose de pied) au point d'observation de l'agent et spécifie le temps restant avant le contact du pied avec cet emplacement. τ est une variable optique qui spécifie une propriété du système agent-environnement, le temps de pré-contact avec un objet physique (approché ou approchant)^b. Le temps de vol correspond au différentiel entre les temps de pré-contact des deux prochaines cibles au sol ($\Delta \tau$). Warren (1988) a alors proposé une loi de contrôle de la longueur de la foulée :

$$I = mg\Delta \tau \quad (1.2.d)$$

où mg est une constante de la force gravitaire. Ainsi l'impulsion verticale peut directement être régulée par $\Delta \tau$. L'Eq. 1.2.d est une illustration de la loi générique décrite

^b Nous discuterons en détail de cette variable informationnelle dans le chapitre suivant car elle est très présente dans la littérature propre à l'étude du mouvement d'interception

par l'Eq. 1.2.c. Les lois de contrôle sont donc un moyen d'identifier les informations environnementales susceptibles d'expliquer la cinématique d'un comportement pour une tâche donnée. Elles constituent des modèles dynamiques simples pour répondre à des problématiques formulées en double hypothèse : l'hypothèse informationnelle (quelle information est utilisée pour réussir la tâche ?) ; l'hypothèse intégratrice (comment cette information est utilisée dans la régulation du mouvement ?).

L'objectif de cette thèse est de proposer un cadre explicatif pour comprendre quelle information guide le mouvement d'interception, et comment. Ce travail s'inscrit donc très exactement dans cette logique de la double hypothèse. Considérant que la réalisation des mouvements d'interception est visuellement guidée, nous traiterons exclusivement des variables optiques susceptibles d'être impliquées dans l'action d'interception.

Nous avons précédemment distingué deux types d'approche de la théorie de l'information. Cette pluralité a fait émerger deux possibilités de formaliser le contrôle de l'action: le contrôle en ligne (*on-line control*) et le contrôle par modèles internes (*model-based control*). Le contrôle en ligne stipule que l'action est guidée par une information disponible pendant le mouvement. Les lois de contrôle s'inscrivent directement dans la logique du contrôle en ligne. Par opposition, le contrôle par modèles internes avance l'idée que l'action est guidée par des représentations internes de l'environnement physique dans lequel évolue l'agent. Le concept de modèle interne a été introduit par Craik (1943/1967). Selon lui, le traitement cognitif permettrait la reconstruction de la réalité au moyen de ces modèles internes dont la finalité serait la prédiction des événements extérieurs du monde physique environnant. Ce type de conceptualisation des mécanismes sous-jacents aux comportements perceptivo-moteurs nécessite de considérer un système prédictif très élaboré. Wolpert et Ghahramani (2000) suggèrent par exemple que nous serions capable de prédire la trajectoire future d'une balle en utilisant un modèle incluant : les équations qui gouvernent les lois physiques (issues des lois de Newton), les paramètres fixes du système (gravité, résistance de l'air, diamètre et masse de la balle), ainsi que l'état initial de la balle (position, vitesse et effet de rotation) :

"When taken together with fixed parameters of the system and the equations governing the physics, the state contains all the relevant time-varying information needed to predict or

control the future of the system. For example, knowing the current position, velocity and spin of a thrown ball, that is the ball's state, allows predictions of its future path [...]" (p. 1212)

En effet, si le traitement cognitif exact de tous ces paramètres était réalisable par un système vivant, il serait alors possible de prédire les événements futurs du monde physique environnant. Récemment Zhao et Warren (2014) ont étudié la validité de ces deux types de contrôle avec le paradigme d'occlusion de l'information courante contenue dans l'environnement. Les auteurs ont pour cela effectué une revue d'études expérimentales pertinentes concernant le contrôle visuel d'actions locomotrices et manuelles. Ils ont rapporté que les résultats de ces différentes études montraient une détérioration rapide de la performance lors de l'occlusion d'une partie de l'environnement. De plus, les participants des études sélectionnées adaptaient leurs mouvements afin de maintenir un contact visuel permanent avec les éléments changeants de l'environnement dans lequel ils évoluaient. Les auteurs ont alors conclu qu'une représentation interne du monde n'était pas suffisante pour contrôler le comportement moteur à des niveaux normaux de performance, et que celle-ci était fortement dépendante de l'information courante. Plus encore, se référant à la littérature relative aux informations visuelles utilisées pour guider l'action, Zhao et Warren (2014) ont considéré que l'information courante est normalement suffisante pour contrôler l'action, sans avoir besoin de faire recours à des modèles internes. L'action serait contrôlée en ligne à la seule condition que l'information soit disponible. Cependant, ils ne rejettent pas l'existence de modèles internes mais minimisent leur influence en développant une hypothèse hybride combinant le contrôle en ligne dans des conditions normales et l'ajout potentiel de stratégies heuristiques pour certaines conditions restreintes.

Dans le cadre de ce travail de thèse nous avons réalisé des études expérimentales sans occlusion totale ou partielle de l'environnement. Ce choix nous a permis de travailler sur la formalisation du contrôle de l'action d'interception dans la logique de d'un contrôle en ligne du mouvement d'interception.

1.3. Objectifs de ce travail

Les tâches d'interception de mobile fournissent un paradigme d'étude pertinent pour comprendre les mécanismes perceptivo-moteurs sous-tendant le contrôle de l'action. En effet, les contraintes spatiales et temporelles qu'elles impliquent, être au bon endroit au bon moment, constituent un vecteur d'analyse riche pour comprendre les comportements systématiques qu'il est possible d'observer. Nous avons choisi la méthode de la réalité virtuelle pour générer et capter les interactions agent-environnement engagées lors d'une tâche d'interception. Cette méthode permet un contrôle expérimental élevé : elle permet de générer un environnement choisi (précisément les trajectoires du mobile dans le cas de l'étude du mouvement d'interception) ; elle assure que tous les participants soient confrontés aux mêmes conditions expérimentales, condition sine qua non d'une compréhension de l'influence spécifique de l'environnement sur le comportement moteur. Nous avons donc proposé plusieurs scénarii expérimentaux dans lesquels les participants devaient intercepter des mobiles sphériques virtuels. Ces mobiles sphériques empruntaient deux types de trajectoires : rectiligne (avec vitesse latérale mais sans accélération latérale) et curviligne (avec vitesse et accélération latérale). Ces deux types de trajectoire constituent selon nous un cadre pertinent d'étude du couple perception-action, du contrôle continu du mouvement. La mise à l'épreuve des hypothèses qui seront émises quant à la nature des variables informationnelles utilisées et des interactions qui s'opèrent alors entre l'agent et l'environnement passera par leur formalisation dans des modèles dynamiques. Ces modèles devront permettre de prédire un patron cinématique du comportement en fonction d'une situation environnementale précise et correspondre à ce qui a été observé expérimentalement.

Dans le prochain chapitre nous faisons un état de la littérature concernant les modèles qui ont été proposés pour décrire les relations information-mouvement mis en œuvre lors de l'interception d'un mobile. Ces modèles répondent à une problématique propre à la logique de la double hypothèse : quelle information visuelle guide les mouvements d'interception et comment est-elle utilisée pour réguler le mouvement ? Ainsi, nous ne ferons pas de revue de la littérature à proprement parler dans

l'introduction de cette thèse. Celle-ci sera faite dans les chapitres expérimentaux, spécifiquement à chaque étude. Ce choix a été fait afin de minimiser les redondances qu'un manuscrit de thèse peut faire figurer. De plus, la description des différents modèles de la littérature relative à l'action d'interception permettra de justifier la problématique qui a émergée durant l'entreprise de ce travail. En effet, la discussion de ces modèles et leur mise en perspective chronologique fera apparaître les convergences et les divergences conceptuelles qui animent les débats scientifiques relatifs aux travaux de recherche sur le mouvement d'interception.

2. Modélisation des relations information-mouvement mises en œuvre lors de l'interception d'un mobile

Dans la littérature, deux types de stratégies perceptivo-motrices ont été mises en évidence pour tenter d'expliquer le comportement dans les tâches d'interception. La stratégie prédictive est basée sur une détermination anticipée du lieu d'interception et du moment de l'interception. Ce type de stratégie s'inscrit dans la logique du contrôle par modèles internes (cf. Chapitre 1). Cette stratégie d'anticipation est rendue possible par extrapolation de la trajectoire du mobile, en prenant en compte les différentes variables qui influencent l'évolution de la trajectoire (vitesse, angle, résistance de l'air, gravité, effet Magnus etc.). Les déductions de l'agent aboutiraient alors à une programmation du mouvement vers l'endroit précis d'interception afin de s'y trouver au bon moment. La stratégie prédictive a été mise à l'épreuve dans plusieurs études. Peper *et al.* (1994) ont été les premiers à montrer que pour l'interception manuelle de balles ayant le même point d'arrivée mais une trajectoire différente, la cinématique du mouvement de la main était différente. L'étude expérimentale qui leur a permis d'observer ces résultats confrontait les participants à des trajectoires pendulaires. Les balles à intercepter, rattachées à un fil, développaient leur trajectoire par l'effet de la force gravitaire lorsque l'expérimentateur décidait de permettre leur chute. Ce protocole expérimental présentait l'avantage de pouvoir réaliser de véritables interceptions, les participants devaient saisir des balles réelles^c. Cependant, l'aspect pendulaire des trajectoires a montré une particularité au niveau informationnel. Nous reviendrons sur cette particularité des trajectoires pendulaires lorsque nous décrirons les modèles dynamiques qui ont été construits sur la base de résultats observés à partir de ce type de protocole expérimental. Néanmoins, Peper *et al.* (1994) ont bien observé des comportements cinématiques différents pour intercepter des balles ayant le même lieu

^c Par opposition à l'interception de balles virtuelles. Comme nous l'avons précédemment mentionné, la méthodologie générale du corps expérimental de ce travail de thèse est la réalité virtuelle.

d'arrivée mais des trajectoires différentes. Ces observations ne vont pas dans le sens de l'utilisation d'une stratégie prédictive. Les résultats de Peper *et al.* (1994) ont été soutenus par les travaux de Montagne *et al.* (1999). Ces derniers ont aussi rapporté des effets de la trajectoire sur la cinématique du mouvement pour des balles avec le même lieu d'arrivée. Il s'agissait dans cette étude expérimentale de trajectoires rectilignes dans un plan transverse et non pendulaires ; on parlera alors d'effet d'angle d'approche plutôt que d'effet de trajectoire. De plus, Montagne *et al.* (1999) ont observé un type de mouvement particulier que l'on nomme mouvement de rebroussement (*reversal movement*). Les mouvements de rebroussement se caractérisent par un changement de direction pendant la réalisation de l'interception. Un premier mouvement est opéré en direction de la position initiale du mobile suivi d'un deuxième mouvement en direction de son futur point d'arrivée. Dans le cas des travaux de Montagne *et al.* (1999) un nombre significatif de mouvements de rebroussement a été rapporté pour des conditions expérimentales où le point d'arrivée du mobile correspondait à la position initiale de la main des participants. Ces derniers opéraient en effet un premier mouvement en direction de la position initiale du mobile puis ils retournaient à leur position initiale pour réussir l'interception. L'observation de ces mouvements n'était pas systématique mais témoigne de la difficulté des participants à prédire le futur point d'arrivée d'une trajectoire rectiligne. Les résultats de ces deux études expérimentales (Peper *et al.*, 1994 ; Montagne *et al.*, 1999) semblent mettre en évidence le fait que les participants de ces études expérimentales n'utilisaient pas d'informations issues de la stratégie prédictive. Afin d'étudier spécifiquement la stratégie prédictive, Craig *et al.* (2006) ont réalisé une expérience faisant appel à la réalité virtuelle. Dans leur tâche, des joueurs de football professionnels occupant le poste de gardien de but devaient juger si des balles dotées d'une rotation latérale (spin), engendrant des trajectoires curvilignes (sous l'influence de l'effet Magnus), termineraient leurs trajectoires dans le but ou non. Pour ce faire, les expérimentateurs ne montraient pas la dernière partie de la trajectoire, seule une première partie était visible. Il s'agissait donc d'une tâche de jugement perceptif pur sans possibilité pour les participants de se déplacer. Les résultats font apparaître des erreurs systématiques dans les jugements pour des trajectoires curvilignes, avec des taux d'erreurs supérieurs à ceux constatés pour trajectoires rectilignes. S'agissant de joueurs professionnels constituant l'élite de l'activité, ceci suggère que le système visuel humain n'est pas capable de détecter les modifications de

trajectoires engendrées par l'effet Magnus. Le caractère systématique des erreurs commises par ces joueurs issus pourtant du haut niveau laisse apparaître les limites de l'utilisation d'une stratégie purement prédictive. Craig *et al.* (2009), dans la lignée des travaux de Craig *et al.* (2006), ont comparé les jugements des experts avec ceux des novices. Les résultats font apparaître des patrons d'erreurs dans le jugement similaires entre les deux groupes de sujets. Cette manipulation souligne les doutes que l'on peut raisonnablement émettre quant à l'utilisation d'une stratégie prédictive.

La notion de stratégie prospective suggère un contrôle de l'action différent conceptuellement. Cette stratégie consiste pour l'agent à instaurer et maintenir une relation spatio-temporelle entre lui et l'objet en mouvement, relation dont la nature garantit un événement futur (comme l'interception). Ce type de stratégie s'inscrit dans la logique du contrôle continu du mouvement (cf. Chapitre 1). Utilisant une stratégie prospective, le sujet régule donc à chaque instant et durant toute la durée de l'action son comportement, dans le but de maintenir la relation, afin de pouvoir intercepter le mobile. McLeod (1996) décrit cette stratégie de la façon suivante:

"This algorithm does not tell fielders where or when the ball will land, but it ensures that they run through the place where the ball drops to catch height at the precise moment that the ball arrives there." (p. 533)

Ainsi, en accord avec notre volonté d'inscrire notre discours selon les fondements conceptuels de l'approche écologique, un des postulats de cette thèse est de considérer que les stratégies perceptivo-motrices mises en œuvre lors de l'interception d'un mobile sont de nature prospective. S'inscrivant dans cette logique, une revue de la littérature a laissé émerger deux champs distincts pour formaliser les interactions continues engagées entre l'agent et son environnement lors d'une action d'interception. Un champ concerne les interceptions locomotrices : être au bon endroit au bon moment nécessite dans ce cas l'annulation de la distance séparant le mobile du point d'observation. Un autre champ est lui relatif aux interceptions manuelles : ici le succès de la tâche requiert l'annulation de la distance entre la main et le mobile, sans déplacement nécessaire du point d'observation. Cette différence a entraîné l'élaboration de modèles différents conceptuellement. Ainsi, cette thèse proposera deux modèles différents, l'un relatif aux tâches d'interception locomotrice, l'autre relatif aux tâches d'interception manuelle.

Nous verrons que ces deux modèles ont la même logique de compréhension des relations information-mouvement mises en œuvre mais respectent une formalisation spécifique relative au type de tâche (locomoteur ou manuel). Nous expliciterons à cet égard cette distinction tout au long de ce deuxième chapitre introductif. Nous allons décrire à présent les différents modèles qui ont été élaborés pour expliquer le comportement quant à ces deux types de tâche. Mais au préalable, nous allons définir les notions propres à l'étude du mouvement d'interception qui seront utilisées pendant la description de ces différents modèles explicatifs. Par notions propres, nous entendons les différentes variables qui ont permis l'élaboration de ces modèles. Deux types de variables peuvent être utilisés : variables SAE et variables optiques (cf. Chapitre1). Les variables SAE renvoient aux propriétés du système agent-environnement, elles sont spécifiées par les variables optiques. Les variables optiques sont donc les variables informationnelles spécifiant les variables SAE.

2.1. Variables SAE et variables optiques pour modéliser l'interception

2.1.1. Variables SAE

Nous détaillerons dans cette partie les variables SAE qui apparaissent dans les différents modèles de la littérature et qui semblent donc pertinentes pour décrire et comprendre les interactions agent-environnement engagées lors de l'interception d'un mobile. Le mouvement relatif entre l'agent et le mobile peut en effet être décrit au moyen de plusieurs variables SAE (Bootsma *et al.*, 1997). Trois d'entre elles ont principalement été utilisées dans les modèles dynamiques de la littérature. L'une de ces trois variables est temporelle ; elle est relative au temps de pré-contact entre l'agent et le mobile, ou correspond au temps restant avant que le mobile ne franchisse l'axe de déplacement de l'agent (pour une interception sur un axe contraint). Ce temps s'exprime par la variable SAE TTC_1 , ou *TTC* pour *Time-To-Contact* (Bootsma *et al.*, 1997). TTC_1 peut-être obtenue à partir de variables physiques, en l'occurrence la distance entre le mobile et l'axe d'interception (distance Z , voir *Figure 2.1.1*), et ses variations au cours du temps :

$$TC_1 = -\frac{Z}{dZ/dt}$$

Les deux autres variables SAE qui ont permis de construire les modèles du mouvement d'interception sont des variables qui décrivent des attracteurs positionnels susceptibles d'expliquer ce qui guide visuellement l'agent à chaque instant. La première de ces deux variable SAE est la position latérale courante du mobile par rapport au point d'observation, la variable XB_0 . Elle décrit un attracteur positionnel courant sur l'axe d'interception obtenue à partir de la variable physique X (distance latérale entre l'agent et le mobile, voir *Figure 2.1.1*) :

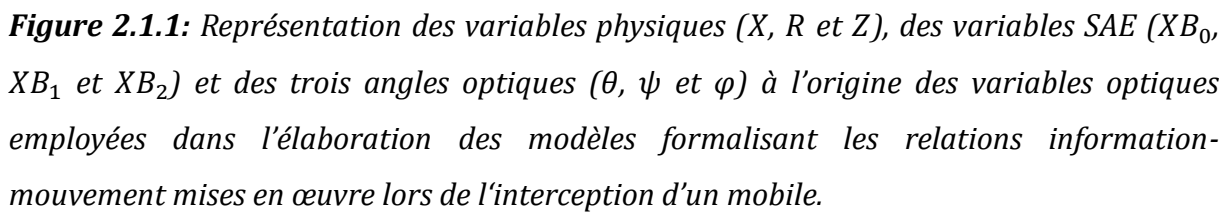
$$XB_0 = X$$

Certains modèles, qui seront décrits ultérieurement, ont suggéré qu'une autre variable SAE guidait les mouvements de l'agent au cours du temps : la variable XB_1 . Cette variable SAE décrit la position de franchissement de l'axe d'interception par le mobile si sa direction est maintenue constante (par absence d'accélération latérale). Elle peut être obtenue à partir de la variable physique X , ses variations au cours du temps (dX/dt) et TC_1 (voir *Figure 2.1.1*):

$$XB_1 = X + \frac{dX}{dt} \left(-\frac{Z}{dZ/dt} \right)$$

où la variable SAE TC_1 est exprimée avec la variable physique Z et ses variations au cours du temps (dZ/dt). L'obtention de XB_1 à partir de XB_0 se fait par un développement en série de Taylor qui se caractérise par la construction d'une série de dérivées successives à partir d'une fonction. Il est ainsi aussi possible d'obtenir XB_2 . La variable SAE XB_2 décrirait alors le point d'arrivée d'un mobile empruntant une trajectoire curviligne (avec accélération latérale constante). La série de Taylor se développe dans notre cas de la façon suivante :

$$\begin{aligned} XB_0 &= X \\ XB_1 &= X + \frac{dX}{dt} \left(-\frac{Z}{dZ/dt} \right) \\ XB_2 &= X + \frac{dX}{dt} \left(-\frac{Z}{dZ/dt} \right) + \frac{1}{2} \frac{d^2X}{dt^2} \left(-\frac{Z}{dZ/dt} \right)^2 \end{aligned}$$



^d Travaux non publiés mais dont le contenu nous est parvenu par communication personnelle.

allons présenter dans la partie suivante (*partie 2.1.2*) spécifient très exactement les variables SAE qui viennent d'être décrites. Selon l'usage général, cela peut aussi être le cas pour des déplacements de mobile dans un plan transverse situé légèrement en-dessous du point d'observation. En revanche, nous verrons que cela ne fonctionne pas dans le cas des trajectoires pendulaires. Nous y reviendrons quand nous relaterons les modèles du mouvement d'interception construits à partir d'études expérimentales pour lesquelles la tâche était d'intercepter des balles empruntant des trajectoires pendulaires.

2.1.2. Variables optiques

Les variables optiques se déclinent à partir des angles θ (*thêta*), ψ (*psi*) et φ (*phi*) (voir *Figure 2.1.1*). θ est l'angle formé par l'axe Z et l'axe point d'observation-centre du mobile. ψ est l'angle formé par l'axe point d'observation-centre du mobile et l'axe d'interception. L'angle φ est la taille optique du mobile en approche. Ces variables angulaires optiques dépendent des variables physiques X , R et Z . θ , ψ et φ spécifient les propriétés du système agent-environnement qui apparaissent dans la littérature pour formaliser les interactions agent-environnement (XB_0 , XB_1 et TC_1). θ/φ spécifie la position latérale courante du mobile par rapport au point d'observation (la variable SAE XB_0)^e :

$$\frac{\theta}{\varphi} = \frac{XB_0}{cal}$$

où cal est une variable physique ayant une fonction de calibration.

$(d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ est une variable optique qui spécifie la position de franchissement de l'axe d'interception par le mobile si sa direction est maintenue constante (la variable SAE XB_1) :

$$\frac{d\theta/dt}{d\varphi/dt} = \frac{XB_1}{cal}$$

Enfin, pour un mobile approchant directement au point d'observation, la variable SAE

^e Plus exactement, la variable optique $(\tan \theta / \sin \varphi)$ spécifie la variable SAE XB_0 , mais considérant que les angles θ et φ restent relativement petits lors d'un mouvement d'interception, nous dénoterons cette variable optique θ/φ (car pour des angles petits $\tan \theta = \theta$ et $\sin \varphi = \varphi$).

TC_1 est spécifiée par la variable optique angulaire $\varphi/(d\varphi/dt)$ (τ , *tau* de Lee 1974, 1976, 1980):

$$\tau(\varphi) = TC_1(Z)$$

$\tau(\varphi)$ spécifie TC_1 (parfois exprimé dans la littérature par *TTC* pour *Time-To-Contact*, à condition que la vitesse d'approche du mobile soit constante). Mais dans le cas où le mobile approchant ne se dirige pas exactement vers le point d'observation, TC_1 est spécifiée par φ et ψ :

$$\tau(\varphi, \psi) = TC_1(Z)$$

Cette généralisation de la variable optique τ a été proposée par Bootsma et Oudejans (1993) puis par Bootsma et Craig (2002). Nous avons vu que le temps restant avant que le mobile ne franchisse l'axe d'interception (variable SAE TC_1) peut être obtenue à partir de la variable physique Z et de ses variations au cours du temps (dZ/dt). Ainsi la formulation générique de τ , la variable optique spécifiant TC_1 est:

$$\tau(\varphi, \psi) = \left(\frac{d\varphi/dt}{\varphi} - \frac{d\psi/dt}{\psi} \right)^{-1} = - \frac{Z}{dZ/dt} = TC_1(Z)$$

Pour un mobile approchant directement vers le point d'observation, ψ a une valeur constante et $d\psi/dt$ est égal à zéro ; donc TC_1 n'est spécifiée que par la variable optique $\varphi/(d\varphi/dt)$.

Les modèles du mouvement d'interception que nous allons décrire dans la prochaine partie ont tous été construits avec les variables que nous venons de décrire. Certains ont inclus directement des variables optiques, d'autres n'ont inclus que des variables SAE. Les modèles incluant des variables SAE sont essentiellement les modèles formalisant le mouvement d'interception manuelle. Pour ce type d'interception, nous pouvons admettre que les déplacements du point d'interception sont négligeables, le but est d'avoir la main au bon endroit au bon moment, et non pas, comme c'est le cas pour les interceptions locomotrices, le point d'observation au point d'interception. Pour certaines tâches d'interception manuelle, les trajectoires du mobile à intercepter peuvent s'inscrire dans un plan fronto-parallèle, où la distance point d'observation-mobile est constante (c'est le cas de nos études expérimentales développées dans les chapitres 4 et

5). Pour ce type de tâche, la variable optique φ est constante et nous n'avons pour le moment pas pu identifier de façon satisfaisante des variables optiques responsables des régulations du mouvement d'interception dans la logique des variables décrites précédemment. En revanche, les variables SAE restent elles identifiables : XB_0 correspond à la position latérale courante du mobile par rapport au point d'observation et XB_1 peut être obtenue grâce à un développement en série de Taylor. Ainsi, certains modèles dynamiques ont inclus des variables SAE et non pas directement des variables optiques. Les deux modèles que nous développerons dans ce travail de thèse s'inscriront d'ailleurs dans cette logique : le modèle de contrôle de l'interception manuelle inclura une variable SAE pour expliquer les interactions agent-environnement (Chapitre 5), le modèle de contrôle de l'interception locomotrice inclura lui directement une variable optique (Chapitre 6).

Deux grands types de modèle ont donc aussi été développés dans la littérature: des modèles du mouvement d'interception locomotrice basés sur l'annulation d'une variable optique (le point d'observation se déplaçant, le but de l'action est d'annuler la variable optique pertinente, c'est-à-dire ramener sa valeur à zéro, assurant l'interception du mobile) ; des modèles du mouvement d'interception manuelle, basé sur l'annulation de la distance séparant la main du mobile. Nous commencerons par décrire les modèles relatifs au mouvement d'interception manuelle. Puis nous décrirons ceux relatifs au mouvement d'interception locomotrice. Il nous faut préciser à présent qu'un grand pan de la littérature relative au mouvement d'interception s'est concentré sur l'étude du mouvement latéral d'interception. Le fait de contraindre le déplacement de l'agent sur un seul axe (axe latéral) permet d'avoir la possibilité de réfléchir en termes de variables SAE et pas seulement en termes de variables optiques. En effet, pour un mouvement d'interception libre (non contraint) les variables SAE TC_1 , XB_0 , XB_1 et XB_2 n'existent pas. Celles-ci expriment des propriétés du système agent-environnement sur un axe défini et sur lequel doit être réalisé l'interception. C'est une des raisons pour lesquelles nous avons réalisé trois études expérimentales d'interception latérales (contrainte sur un axe latéral). Ceci nous a permis dans le cas de l'étude de l'interception latérale manuelle d'émettre des hypothèses sur les régulations du mouvement via des variables SAE alors que nous n'avons pas encore identifier les variables optiques qui les spécifient (chapitres expérimentaux 4 et 5). De plus, l'étude de l'interception latérale présente l'avantage pour l'expérimentateur de savoir où doit être l'agent au moment où le mobile franchit l'axe

d'interception pour évaluer la réussite de la tâche. Au regard de ces considérations, les études expérimentales qui ont été menées et détaillées dans les chapitres expérimentaux 4, 5 et 6 contraignaient les participants à des interceptions sur un axe latéral. Dans la partie suivante, nous allons décrire les modèles formalisant l'interception manuelle, et dans les faits, tous se sont intéressés au contrôle du mouvement sur un axe latéral.

2.2. Modélisation de l'interception manuelle latérale

Nous le rappelons, pour des interceptions manuelles, les déplacements du point d'observation peuvent être négligés, celui-ci est donc considéré comme fixe ; l'objectif de la tâche consiste à annuler la distance entre la main et la position du mobile lorsque celui-ci franchit l'axe latéral de déplacement de l'agent.

2.2.1. Peper *et al.* (1994) : le modèle de Vitesse Requise

De nombreux travaux de recherche relatifs à l'interception latérale manuelle se sont fondés sur les apports théoriques du modèle de vitesse requise initialement proposé par Peper *et al.* (1994). Ce modèle décrit le contrôle instantané de la vitesse de la main pour réussir l'interception d'un objet en approche. Peper *et al.* (1994) proposaient que les mouvements de la main sont régulés sur la base d'une vitesse requise (V_{req}), à chaque instant de l'action, définie par le rapport de la distance latérale entre la position de la main (X_h) et celle du mobile (XB_0) au temps de pré-contact de ce mobile avec l'axe du mouvement de la main ($TC_1(Z)$) :

$$V_{req} = \frac{XB_0 - X_h}{TC_1}$$

En déplaçant continuellement la main à la vitesse requise courante, la distance latérale main-mobile se réduira à zéro dans le temps restant imparti. Le modèle prédit un saut de vitesse au début de l'action d'interception quand la vitesse requise n'est pas encore régulée. Dans les faits, observables expérimentalement, la vitesse de la main est initialement zéro et augmente progressivement. Pour dépasser cette limite, Peper *et al.*

(1994) ont incorporé une fonction d'activation $\Omega(t)$ pour une nouvelle formulation du modèle de vitesse requise :

$$V_{req} = \Omega(t) \frac{XB_0 - X_h}{TC_1}$$

où $\Omega(t)$ est une fonction de forme sigmoïdale incluant quatre paramètres. Elle assure l'augmentation progressive de la vitesse de la main. Peper *et al.* (1994) ont fait l'hypothèse que l'attracteur de la main au cours du temps est la variable SAE XB_0 , la position latérale courante du mobile pour des trajectoires rectiligne. Cette variable est spécifiée par la variable optique θ/φ calibrée par une variable physique (dimension du mobile). L'incorporation de cette variable SAE comme attracteur de la main permettait de simuler l'effet d'angle d'approche des trajectoires de balles sur les patrons cinématiques de la main. En effet, les observations expérimentales montraient des différences systématiques dans la cinématique de la main pour intercepter des balles arrivant au même endroit mais avec des positions de départ différentes (pour des trajectoires pendulaires). Ce modèle a posé les fondements du concept de vitesse requise pour intercepter un mobile en approche. Dans une certaine mesure, tous les modèles qui ont suivis s'inscrivent dans cette logique, mais se distinguent de deux façons : soit ils décrivent une formalisation des interactions agent-environnement différente ; soit ils incluent une variable SAE autre que XB_0 , en l'occurrence XB_1 (variable SAE spécifiée par la variable optique $(d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ calibrée).

2.2.2. Bootsma *et al.* (1997) : amélioration du modèle de Peper *et al.* (1994)

Dans leur modèle Bootsma *et al.* (1997) ont préféré ne plus utiliser la fonction d'activation incorporée dans celui de Peper *et al.* (1994). Ce choix a été fait afin d'élaborer un modèle dans lequel chaque élément puisse être expliqué, en lui attribuant un sens écologique. Pour permettre la simulation d'une augmentation de la vitesse de la main progressive, sans saut immédiat, Bootsma *et al.* (1997) ont proposé un modèle toujours basé sur le concept de vitesse requise, mais incorporant l'accélération de la main obtenue par la différence entre la vitesse requise (V_{req}) et la vitesse courante (V_h) :

$$A_h = \alpha V_{req} - \beta V_h$$

où α et β sont des constantes spécifiques aux particularités de la tâche d'interception étudiée. Elles peuvent être amenées à prendre des valeurs différentes afin de refléter la singularité de l'environnement ou celle de l'agent. Le modèle suggère que la vitesse courante de la main (V_h) est continuellement attirée par une valeur proportionnelle de sa vitesse requise (V_{req}). Le rapport α/β représente cette constante de proportionnalité. A_h représente l'accélération de la main conduisant sa vitesse vers la valeur requise afin de réussir l'interception. Bootsma *et al.* (1997) ont suggéré que ce modèle pouvait être utilisé pour expliquer à la fois l'initiation et le contrôle du mouvement d'interception. En effet, l'initiation dépendrait de l'atteinte d'une valeur critique de la vitesse requise (V_{req}). Avec ce modèle aussi, et dans la logique conceptuelle des travaux de Peper *et al.* (1994), l'attracteur de la main au cours du temps était la variable SAE XB_0 . La valeur écologique de ce modèle est soutenue par les résultats expérimentaux de Montagne *et al.* (1999) que nous avons brièvement décrit précédemment. Rappelons que les conditions expérimentales de Montagne *et al.* (1999) demandaient aux participants d'intercepter des mobiles empruntant des trajectoires rectilignes dans le plan transverse. Les trajectoires rectilignes étant dépourvues d'accélération latérale, la position de franchissement de l'axe d'interception est exprimée par la variable SAE XB_1 (la direction du mobile étant maintenue constante), celle-ci est donc constante et exprime le futur point d'interception. Ainsi la variable SAE XB_1 s'avère être constante tout au long d'une trajectoire rectiligne et commune à différentes trajectoires ayant le même point d'arrivée. Elle ne peut donc pas expliquer l'effet d'angle d'approche rapporté par les expérimentateurs. Aussi, la seule variable susceptible d'expliquer les mouvements de rebroussement observé par Montagne *et al.* (1999) était la variable XB_0 car XB_1 exprimait (dans le cas des conditions expérimentales laissant observer des rebroussements) la position initiale des participants. Si XB_1 était la seule variable responsable des régulations du mouvement, les participants n'auraient jamais effectué de mouvements de rebroussement. L'effet d'angle d'approche et le nombre significatif de mouvements de rebroussement observés par Montagne *et al.* (1999) sont les raisons pour lesquelles leurs résultats soutiennent l'hypothèse d'une influence de la variable SAE XB_0 pour expliquer les régulations du mouvement d'interception formalisée avec le modèle de Bootsma *et al.* (1997).

Dessing *et al.* (2002) ont simulé les modèles de Peper *et al.* (1994) et Bootsma *et al.* (1997) avec les conditions expérimentales de Montagne *et al.* (1999) et argumentaient que les simulations ne prédisaient pas de façon satisfaisante les comportements observés. Ils ont alors proposé une autre formalisation des interactions agent-environnement engagées dans l'action d'interception.

2.2.3. Dessing *et al.* (2002) : le modèle (R)(R)VITE

Dessing *et al.* (2002) ont proposé un autre modèle de contrôle du mouvement d'interception latérale manuelle qui se différencie principalement des précédents en étant un modèle de contrôle se réclamant d'inspiration neurophysiologique. Il s'agit d'une extension des travaux de Bullock et Grossberg (1988a, b, 1991) qui ont élaboré le modèle de contrôle *Vector Integration To Endpoint (VITE)* pour des mouvements de la main vers des cibles statiques:

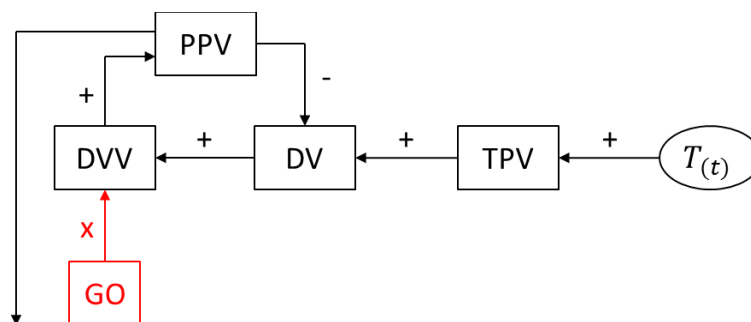


Figure 2.2.3.a: Représentation des circuits du modèle VITE. DV (Difference Vector) est la distance entre la position du mobile (Target Position Vector ou XB_0) et la position de la main PPV (Present Position Vector ou X_h). DVV (Desired Velocity Vector) est la fonction de commande de la vitesse de la main faisant intervenir le signal GO.

Le signal GO a les mêmes caractéristiques que la fonction d'activation $\Omega(t)$ du modèle de Peper *et al.* (1994). Le signal GO est une fonction de forme sigmoïdale caractérisée par un déclenchement et une pente. DDV, la vitesse désirée de la main, est donc modulée avec ce signal GO : il déclenche l'initiation du mouvement de la main et agit sur son déroulement temporel. Dessing *et al.* (2002) ont reformulé le modèle de Bullock et Grossberg (1988) suivant deux étapes : la première aboutira au modèle RVITE (*Required Velocity*

Integration To Endpoint), la deuxième au modèle *RRVITE* (*Relative and Required Velocity Integration To Endpoint*). Le modèle *RVITE* se distingue du modèle original de Bullock et Grossberg (1988a, b, 1991) par l'incorporation de la variable SAE TC_1 , qui a directement été intégré au signal *GO*, agissant ainsi directement sur la commande des mouvements de la main. Cette fonction *GO* permettant déjà de définir le déclenchement et le déroulement temporel du mouvement, l'incorporation de la variable SAE TC_1 permettait alors de fixer la fin du mouvement. Ces composantes (initiation, déroulement temporel et fin du mouvement) caractérisent à elles seules largement la cinématique d'un mouvement d'interception d'une amplitude donnée, et toutes trois sont définies dans le modèle de contrôle *RVITE* par le signal *GO*. Dessing *et al.* (2002) n'ont pas mentionné avoir réalisé des simulations de ce modèle *RVITE* avec les conditions expérimentales de Montagne *et al.* (1999). Ils ont, dans une deuxième étape, formulé le modèle *Relative and Required Velocity Integration To Endpoint* (*RRVITE*) :

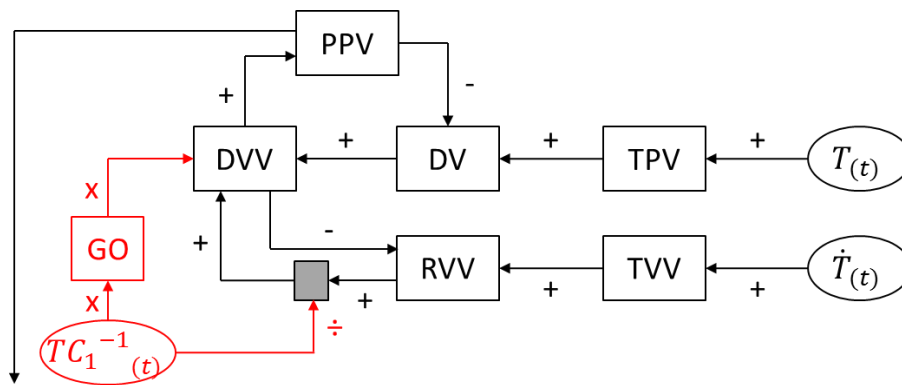


Figure 2.2.3.b: Représentation des circuits du modèle *RRVITE*. *TVV* (*Target Velocity Vector*) est la vitesse du mobile. *RVV* (*Relative Velocity Vector*) caractérise l'influence d'un mobile s'approchant de la main ou s'éloignant de celle-ci.

où le principal changement opéré avec ce modèle par rapport au modèle *RVITE* est la prise en compte du déplacement du mobile, *TVV* dans le modèle (soit dX/dt dans la Figure 2.1.1). Le modèle a donc été construit pour que les régulations de la main ne soient pas les mêmes si le mobile se rapproche de la main ou s'il s'en éloigne (*RVV*), quand bien même le point d'interception serait le même. Mais la logique demeure inchangée, le contrôle de la main est basé sur l'identification d'une distance à parcourir, générant une commande du mouvement de la main par le signal *GO* fixant l'initiation du mouvement, son déroulement temporel et sa fin. Les simulations de ce modèle sur les

conditions expérimentales des études de Montagne *et al.* (1999) correspondaient de façon jugée satisfaisante avec les données expérimentales observées, ce qui les a amenés à valider leurs hypothèses quant à (i) aux variables SAE qui permettent la réussite de l'interception (*TTV* donc dX/dt et *TPV* donc XB_0) et (ii) comment s'opèrent les interactions engagées. Les simulations ont nécessité de fixer sept paramètres. Mais ils ont en effet pu reproduire les effets d'angle d'approche observés avec l'étude de Montagne *et al.* (1999) (patrons cinématiques de la main différents pour des trajectoires rectilignes avec la même arrivée mais un départ différent). Ils ont aussi pu simuler les mouvements de rebroussement observés dans la même étude (caractérisés par un premier mouvement en direction de la position de départ du mobile suivi d'un deuxième mouvement de retour vers la position initiale de la main correspondant au point d'interception). Le contrôle de la main formalisé par le modèle *RRVITE* ne remet pas en cause l'influence de la variable SAE XB_0 (au travers de la variable *TPV*) même s'il y ajoute celle de la vitesse latérale du mobile dX/dt (avec la variable *TVV*).

Les trois modèles que nous venons de décrire suggèrent tous l'influence de la variable SAE XB_0 pour intercepter manuellement un mobile en approche. Les travaux de Jacobs et Michaels (2006) ainsi que ceux de Michaels *et al.* (2006) ont avancé l'idée que la main serait attirée par la variable optique $(d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ calibrée (qui spécifie la variable SAE XB_1 pour des trajectoires rectilignes dans un plan transverse).

2.2.4. Jacobs et Michaels (2006) : discussion du modèle de Bootsma *et al.* (1997)

Tout d'abord nous devons préciser que Jacobs et Michaels (2006) ne se sont intéressés qu'aux variables optiques pour expliquer le comportement d'interception et n'ont pas jugé nécessaire d'associer de variables SAE à leurs hypothèses. Jacobs et Michaels (2006) ont modifié le modèle de Bootsma *et al.* (1997) sur trois points. En premier lieu ils ont considéré que l'agent pourrait se fier à $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$, la variable optique qui spécifie la position de franchissement de l'axe d'interception par le mobile si sa direction est maintenue constante (XB_1) pour réaliser un mouvement d'interception (cal est un paramètre de calibration comme la taille du mobile). Ils ont donc écarté θ/ϕ qui spécifie elle XB_0 (modulo un paramètre de calibration) et ont pour cela réalisé une série d'expériences qui les ont amenés à considérer que la variable

optique $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ guidait les mouvements d'interception latérale manuelle. Nous avons expliqué précédemment que cette variable optique angulaire spécifiait la variable SAE XB_1 dans le cas de mobiles se déplaçant dans le plan transverse. En second lieu, ils ont changé les noms et les rôles des paramètres de la constante de proportionnalité entre la vitesse requise et la vitesse courante de la main (α et β). Ils ont expliqué ce choix avec deux arguments : le premier est que selon eux le concept de proportionnalité paramétrique ne se prête pas à une interprétation claire ; le deuxième est qu'ils réduiraient la logique du modèle. En effet, il leur semblait raisonnable de supposer qu'un modèle simulant l'accélération de la main devrait prédire une diminution de celle-ci au fur et à mesure que la vitesse courante se rapproche de la vitesse requise. Or, attribuer à α et β des valeurs différentes prédit une augmentation de la valeur absolue de l'accélération pour une vitesse courante de la main correspondant à sa valeur requise. Dans cette logique, Jacobs et Michaels (2006) ont incorporé dans leur modèle deux paramètres de calibration : un premier relatif à l'ensemble de la différence entre la vitesse requise et la vitesse courante (c_1) ; un deuxième relatif uniquement à la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ (c_2). Enfin, en troisième et dernier lieu, ils ont changé la variable SAE TC_1 pour la variable optique qui la spécifie $((d\phi/dt)/\phi - (d\psi/dt)/\psi)^{-1}$ (voir *partie 2.1*), ce choix étant justifié au regard de la littérature (Bootsma et Oudejans, 1993 ; Bootsma et Craig, 2002) montrant que cette variable optique spécifiait effectivement TC_1 pour des mobiles approchant directement ou non vers l'agent. Ce choix leur a aussi permis de proposer un modèle homogène en ne faisant figurer que des variables optiques. Le modèle résultant se décrivait alors de la façon suivante :

$$A_h = c_1 \left(\frac{c_2(cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)) - X_h}{((d\phi/dt)/\phi - (d\psi/dt)/\psi)^{-1}} - V_h \right)$$

Ce modèle est proche de celui de Bootsma *et al.* (1997) en termes de formalisation. Il se différencie par le rôle des constantes paramétriques c_1 et c_2 , ainsi que par la variable SAE responsables des régulations du mouvement : XB_1 (spécifiée par $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$) au lieu de XB_0 (spécifiée par $cal * \theta/\phi$), la variable $((d\phi/dt)/\phi - (d\psi/dt)/\psi)^{-1}$ étant la variable optique spécifiant TC_1 . Aussi, et de la même manière que Bootsma *et al.* (1997), Jacobs et Michaels (2006) suggéraient que le

mouvement doit être initié lorsque la vitesse requise atteint une valeur critique. Les auteurs ont simulé ce nouveau modèle afin de savoir laquelle des deux variables optiques $cal * \theta/\varphi$ ou $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ expliquait au mieux les patrons cinématiques observés expérimentalement. Pour ce faire, ils ont utilisé le même protocole expérimental que Peper *et al.* (1994) qui générait des trajectoires pendulaires (voir *Figure 2.2.4.A*). Pour une trajectoire pendulaire dont le mouvement est généré par la gravité, le mobile décrit un arc de cercle pour lequel la variable optique φ ne varie pas de la même façon que pour une trajectoire rectiligne dans un plan transverse (et donc $d\varphi/dt$ non plus). Il résulte de cette particularité des valeurs non constantes au cours du temps de la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ mais surtout non communes à des trajectoires ayant pourtant le même point d'arrivée (voir *Figure 2.2.4.B*).

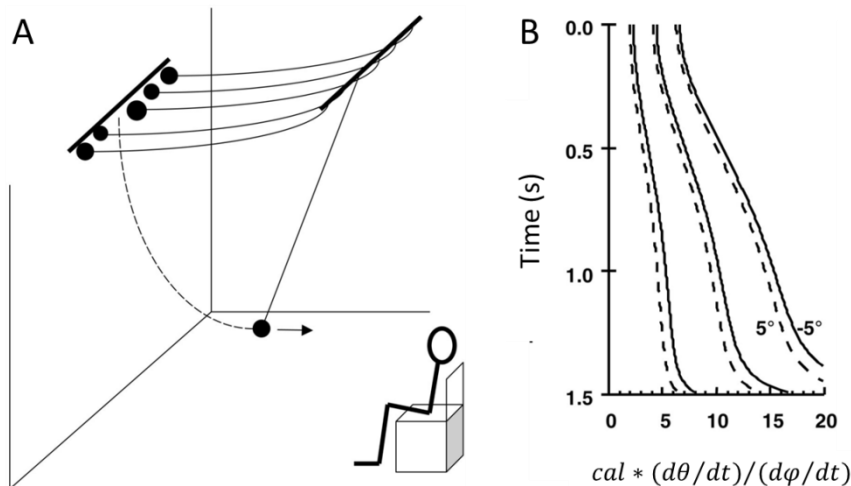


Figure 2.2.4 (Michaels *et al.*, 2006) : (A) Représentation du protocole expérimental utilisé dans les études de Peper *et al.* (1994), Jacobs et Michaels (2006) ainsi que celles de Michaels *et al.* (2006). (B) Evolution de la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ au cours du temps pour différentes trajectoires. Chaque paire représente deux trajectoires différentes (trait plein ou tiret) mais ayant le même point d'arrivée.

Les trajectoires pendulaires présentent donc des caractéristiques différentes d'un point de vue informationnel de celles des trajectoires rectilignes dans un plan transverse. Pour des trajectoires rectilignes dans un plan transverse, $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ spécifie la variable SAE XB_1 constante au cours du temps et

communes aux trajectoires ayant le même point d'arrivée. Elle peut donc difficilement expliquer l'effet systématique d'angle d'approche sur la cinématique du mouvement d'interception. En revanche, la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ n'est pas constante au cours temps pour des trajectoires pendulaires. Et $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ n'est pas non plus commune aux trajectoires pendulaires ayant le même point d'arrivée mais empruntant des trajectoires différentes (voir *Figure 2.2.4.B*). Il pourrait ainsi s'agir d'une des raisons pour lesquelles Jacobs et Michaels (2006) ont proposé que cette variable optique était responsable des régulations du mouvement d'interception.

Pour résumer, le modèle de Jacobs et Michaels (2006) est conceptuellement proche de celui de Bootsma *et al.* (1997), la différence majeure étant le choix de la variable informationnelle (optique) suggérée comme attracteur de la main au cours de l'action, $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ au lieu de $cal * \theta/\phi$. Dans une publication associée, Michaels *et al.* (2006) ont réalisé des simulations afin de tester la validité de leurs hypothèses.

2.2.5. Michaels *et al.* (2006) : réemploi du modèle VITE

De façon surprenante, Michaels *et al.* (2006) n'ont pas réalisé de simulation avec le modèle discuté dans la partie précédente (réalisé par le même groupe d'auteurs). Ils ont préféré réemployé le modèle VITE de Bullock et Grossberg (1988) aussi décrit précédemment (*partie 2.2.3*) pour simuler le mouvement d'interception de trajectoires pendulaires. A la différence de Dessing *et al.* (2002), Michaels *et al.* (2006) ne l'ont pas modifié dans sa structure :

"[...] unlike Dessing et al. (2002), we found no reason to question the success of the VITE model in predicting lateral interceptive movements." (p. 469)

En revanche ils l'ont modifié dans sa partie informationnelle. Ils ont ainsi réalisé leurs simulations à partir d'un modèle formalisé de la façon suivante :

$$\frac{dD}{dt} = \alpha [-D + ((cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt))_{delay} - O) - X_h]$$

$$V_h = G[D]^+$$

où D est la distance main-mobile, α une constante paramétrique, la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ comme responsable des régulations du mouvement de la main (avec un délai temporel), O est un paramètre de décalage spatial, et X_h est la position courante de la main, développé comme le produit de D et du signal GO . Le signal GO est une fonction sigmoïdale (voir *partie 2.2.3*). Pour simuler ce modèle, Michaels *et al.* (2006) définissaient la position initiale de la main, le moment d'initiation du mouvement et les constantes paramétriques du modèle. Les auteurs ont rapporté que sur les quatre paramètres du modèle *VITE* seulement un a été adapté pour chaque session expérimentale : la pente de la fonction GO . La manipulation des trois autres paramètres semblait avoir eu peu d'impact en termes d'ajustement. A ces quatre paramètres, deux ont été ajoutés, O (décalage spatial) et le délai appliqué à la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ (décalage temporel). Michaels *et al.* (2006) ont fait l'état d'une excellente correspondance entre leurs données expérimentales et les simulations de leur modèle:

"The fits seem excellent, especially when compared with the predictions of a simple, optimal movement (the direct baseline). This leads us to conclude that we may have captured the information-movement relation for lateral interception in this task, [...]" (p. 469)

La captation des caractéristiques des patrons cinématiques observés expérimentalement pouvait être due à la particularité des trajectoires pendulaires (les simulations ont été réalisées et comparées avec des données expérimentales provenant de l'interception de trajectoires pendulaires) ; mais elle pouvait aussi être due à l'utilisation dans le modèle de la fonction sigmoïdale GO qui permet de fixer l'initiation du mouvement, son déroulement temporel. Finalement le virage épistémologique pris par ses travaux, dans la lignée de ceux de Jacobs et Michaels (2006), est la suggestion de l'utilisation de la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ pour intercepter un mobile en approche (qui spécifie XB_1 pour le cas de trajectoires rectilignes dans le plan transverse). Il s'agit donc du premier modèle d'interception latérale manuelle qui inclurait XB_1 comme attracteur de la main plutôt que XB_0 . Ce choix a été soutenu par les travaux de Dessing et Craig (2010).

2.2.6. Dessing et Craig (2010) : retour au modèle de Vitesse Requise

Dessing et Craig (2010) ont élaboré un modèle de contrôle d'interception latérale manuelle à partir de données recueillies pour une tâche d'interception locomotrice et manuelle, où le point d'observation était donc en mouvement. Cela suggère que l'agent intègre ses déplacements propres et connaît la position de sa main par rapport à la balle et à son point d'observation pour intercepter un mobile. Dessing et Craig (2010) ont proposé que la variable SAE XB_1 est responsable des régulations du mouvement d'interception latérale manuelle. Ils ont alors formalisé un modèle de contrôle très proche de celui de Peper *et al.* (1994) :

$$V_h = G \frac{XB_1 - X_h}{TC_1}$$

où G est ici un gain (constante paramétrique fixé à 0.45) destiné à permettre une augmentation progressive de la vitesse courante de la main (V_h). Le modèle est donc effectivement très proche de celui de Peper *et al.* (1994) bien qu'il n'incorpore pas de fonction d'activation. Dessing et Craig (2010) adaptaient à posteriori l'initiation du mouvement avec les données expérimentales recueillies. Cependant les auteurs ont dû incorporer une stratégie dite conservatrice limitant le déplacement des participants à une certaine distance. Cette modification s'est alors caractérisée par le fait que la valeur de la variable SAE XB_1 ne pouvait pas dépasser une limite fixée à $\pm 1,5$ m. Leur étude expérimentale s'est efforcée d'être très proche de la réalité avec la simulation d'un environnement virtuel aux dimensions d'un véritable stade de football (terrain, but, ballon etc.). La limite $\pm 1,5$ mètre choisie ne correspondait pas à la distance séparant la position initiale des participants et les montants du but virtuel mais à la distance que les participants devaient parcourir pour intercepter les mobiles virtuels des conditions expérimentales pour lesquelles le point d'interception était le plus éloigné de leur position initiale.

Les travaux de Dessing et Craig (2010), dans la logique de ceux de Peper *et al.* (1994) et Bootsma *et al.* (1997), suggèrent que le contrôle de l'action d'interception est basé sur le concept de vitesse requise obtenue par le rapport entre une distance à parcourir

(entre un attracteur et la main) et le temps de pré-contact. Mais ces travaux montrent des divergences quant à l'attracteur potentiel de la main (variables SAE XB_0 ou XB_1) responsable des régulations du mouvement. Il s'agit d'une question à laquelle il nous faudra apporter des éléments de réponse avec ce travail de thèse, en examinant le potentiel explicatif respectif de ces deux variables. Cela passera par l'étude expérimentale du mouvement d'interception latérale manuelle (cf. Chapitre 4 et 5).

Pour résumer, la littérature a fait émerger deux variables SAE (XB_0 et XB_1) pour expliquer ce qui pourrait guider les mouvement de la main lors de l'interception latérale manuelle et répondre ainsi à la première hypothèse (quoi ?). Quant à la deuxième hypothèse sur la manière dont est utilisée la variable SAE pertinente (comment ?), là aussi deux propositions ressortent de la littérature : la première peut se définir à partir du concept de vitesse requise qui peut être obtenue à partir d'un rapport entre une distance à parcourir (la distance séparant la main d'un attracteur positionnel courant exprimé par la variable SAE pertinente) et un temps imparti pour réaliser l'action (exprimé par la variable SAE TC_1) ; une deuxième, représenté par les travaux qui se sont inscrits dans la logique conceptuelle du modèle *VITE* (Bullock et Grossberg, 1988), se caractérise par le développement d'un modèle de traitement de l'information sur la base de considérations neurophysiologiques mais ne questionne pas les entrées informationnelles pertinentes.

2.3. Modélisation de l'interception locomotrice

Pour les interceptions locomotrices, le point d'observation se déplace afin d'être au bon endroit au bon moment, ce qui peut être assuré par l'annulation d'une variable optique pertinente. Les modèles que nous allons présenter se sont construit sur cette base conceptuelle.

2.3.1. Déplacements libres dans un plan

Pour l'étude des déplacements libres (c'est-à-dire non contraints) d'un agent pour intercepter un mobile, de nombreux travaux se sont concentrés sur la correspondance

des comportements observés expérimentalement avec deux types de stratégies distinctes : la poursuite classique et l'interception classique. Dans le cadre d'un mouvement non contraint, la poursuite classique est réalisée par un déplacement, à chaque instant, dans la direction de la cible (c'est-à-dire le mobile). Fajen et Warren (2007) ont noté que pour un agent la stratégie de poursuite classique consiste à aligner le vecteur vitesse de son déplacement (v_a) avec la cible à atteindre (voir *Figure 2.3.1.A*). Il faut pour cela annuler la variable optique β (*target-heading angle*, ou angle de gissement, formé au point d'observation par la position de la cible et la direction de déplacement de l'agent), ce qui signifie ramener sa valeur à zéro. La poursuite classique a été documentée dans l'étude de différents types de mouches (Land et Collet, 1974 ; Boeddeker *et al.*, 2003), des abeilles (Gries et Koeniger, 1996) et des cicindèles (Gilbert, 1997 ; Haselsteiner *et al.*, 2014).

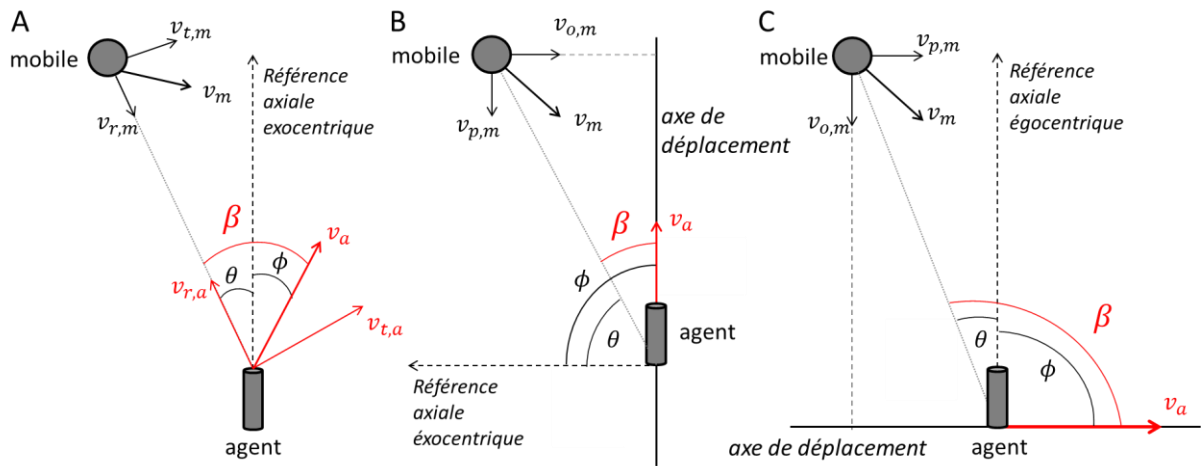


Figure 2.3.1 : Représentation du déplacement d'un agent à travers un environnement contenant une cible se déplaçant dans le plan transversale. **(A)** Représentation des variables θ (angle de relèvement de la cible) et ϕ (direction de déplacement de l'agent) pour un agent se déplaçant librement (plan bidimensionnel). La variable optique β (l'angle de gissement) se définit elle de façon égocentrique avec la cible et la direction de déplacement de l'agent. **(B)** Représentation d'un déplacement contraint sur un axe longitudinal. Pour permettre l'interception, la cible doit avoir une vitesse orthogonale ($v_{o,m}$) réduisant la distance du mobile avec l'axe d'interception. **(C)** Représentation d'un déplacement contraint sur un axe latéral. Dans cette situation l'axe exocentrique de référence coïncide avec l'axe égocentrique de référence. Dans chacune des trois situations $\beta = \theta - \phi$.

La stratégie alternative, l'interception classique (ou *Constant Target-Heading Angle strategy*), est caractérisée par un déplacement vers un point vers lequel se dirige la cible. Cette stratégie est rendue possible par le maintien constant de l'angle β , comme l'on expliqué Lanchester et Mark (1975):

“on a course that will keep the angular deviation of the target from the line of travel constant.” (p. 628)

La stratégie de l'interception classique consiste dans le maintien constant de l'angle β à une valeur différente de zéro. Pour que l'agent réussisse l'interception, il faut que sa vitesse transversale corresponde à celle du mobile ($v_{t,a} = v_{t,m}$) tout en s'assurant que sa distance avec celui-ci se réduise ($v_{r,a} > v_{r,m}$, voir *Figure 2.3.1.A*). Cette stratégie d'interception classique a été documentée dans plusieurs espèces animales comme les libellules (Olberg *et al.*, 2000), les chauve-souris (Ghose *et al.*, 2006), les chiens (Shaffer *et al.*, 2004) et les humains (Fajen et Warren, 2004).

En résumé, le contrôle de l'action d'interception par stratégie de poursuite classique consisterait dans l'annulation de la variable optique β alors que le contrôle par stratégie d'interception classique consisterait elle dans l'annulation de la variable $d\beta/dt$, équivalent au maintien de β à une valeur constante différente de zéro. Les simulations de ces deux stratégies au moyen de modèles dynamiques ont amené Fajen et Warren (2007) à deux constats : un modèle de contrôle de l'action basé sur la stratégie de poursuite classique (annuler la variable optique β , c'est-à-dire ramener sa valeur à zéro) ne parvenait pas à simuler les patrons comportementaux observés expérimentalement. Mais un modèle basé sur la stratégie d'interception classique (annuler la variable optique $d\beta/dt$) n'y parvenait pas non plus de façon satisfaisante. Plus précisément, cela produisait pour un certain nombre de conditions un retard dans le comportement simulé. Fajen et Warren (2007) ont alors démontré que le contrôle dynamique de l'action serait basé sur l'annulation des variations de θ (*Constant Bearing Angle strategy*, voir *Figure 2.3.1.A*). $d\theta/dt$ est une variable qui correspond à la différence entre la variable optique $d\beta/dt$ et la variable proprio-vestibulaire $d\phi/dt$ (ϕ est un angle relatif au déplacement propre de l'agent exprimant la direction du mouvement par rapport à un axe de référence exocentrique). Ainsi, le maintien constant de la variable θ (donc

l'annulation de ses variations exprimées par la variable $d\theta/dt$) s'accompagne du maintien constant de β ($d\theta/dt = d\beta/dt - d\phi/dt$). β est une variable optique dépendante de la variable θ . Le modèle alors construit par Fajen et Warren (2007) permettait de réaliser des simulations cohérentes avec les données expérimentales. Ils ont donc proposé que le contrôle de l'action d'interception est basé sur l'annulation de la variable $d\theta/dt$ et non sur celle de $d\beta/dt$ (voir aussi Olberg *et al.*, 2000). Ils ont alors proposé un modèle dynamique formalisant la stratégie d'interception classique :

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = -b \frac{d\phi}{dt} - k_m \frac{d\theta}{dt} (D + c_1)$$

où b , k_m et c_1 sont des constantes paramétriques, et D représente la distance agent-mobile. Ce modèle suggère donc que le contrôle du mouvement d'interception se fait grâce à un changement d'orientation de l'agent ($d^2\phi/dt^2$) sur la base de l'annulation de la variable $d\theta/dt$ ($d\theta/dt = d\beta/dt - d\phi/dt$). Mais d'un point de vue optique, les auteurs ont suggéré que la variable $d\beta/dt$ était responsable des régulations du mouvement d'interception.

Finalement, Fajen et Warren (2007) ont réaffirmé avec cette contribution que l'interception d'un mobile (ou l'atteinte d'une cible) pouvait être réalisée au moyen de deux types de stratégie : la stratégie de poursuite classique ou la stratégie d'interception classique (voir aussi Lanchester et Mark, 1975). La première est basée sur l'annulation de la variable optique β que l'on peut aussi retranscrire avec la forme suivante : $d^0\beta/dt^0$. L'information qui guide le mouvement pour une action de poursuite est une information d'ordre zéro. La deuxième stratégie évoquée est celle de l'interception classique, elle est basée sur l'annulation de la variable optique $d\theta/dt$ (ou $d^1\theta/dt^1$). L'information qui guiderait alors l'action serait donc une information de premier ordre. Fajen et Warren (2007) se sont positionnés en explicitant que la stratégie utilisée par le système humain serait celle de l'interception classique avec utilisation d'une information de premier ordre $d^1\theta/dt^1$. Ce positionnement est appuyé par les nombreux travaux relatifs à l'étude de l'interception locomotrice pour des déplacements contraints sur un axe.

2.3.2. Déplacements contraints sur un axe

a. La stratégie *CTHA*

L'étude du mouvement d'interception contraint sur un axe a généré une confusion dans la littérature quant aux variables responsables des régulations du comportement. Une stratégie basée sur le maintien constant de la variable β est une stratégie de maintien de l'angle de glissement constant (ou *Constant Target-Heading Angle strategy*, *CTHA strategy* dans la littérature). Alors qu'une stratégie basée sur le maintien constant de la variable θ est une stratégie de maintien de l'angle de relèvement constant (ou *Constant Bearing Angle strategy*, *CBA strategy* dans la littérature). Or, de nombreux travaux ont dénoté stratégie *CBA* des comportements régulés à partir du maintien constant de la variable β (Chardenon *et al.*, 2004, 2005 ; Bastin *et al.*, 2006 ; Morice *et al.*, 2010). Il fallait utiliser le terme *CTHA* pour qualifier ce type de stratégie. Cette confusion a pu perdurer car les variables angulaires β et θ sont complémentaires pour des interceptions contraintes sur un axe (voir *Figure 2.3.1.B-C*). Pour ce type de déplacement, l'angle ϕ est constant (90° ou $\pi/4$ par rapport à un axe egocentrique de référence), $d\phi/dt$ est égale à zéro (voir *Figure 2.3.1.B-C*). Car il existe une relation directe entre β , θ et ϕ ($\beta = \theta - \phi$), un modèle du mouvement d'interception sur un axe contraint peut fonctionner avec β ou θ . Nous allons décrire la stratégie *CTHA* (*CBA* dans la littérature) en utilisant la variable informationnelle optique β et non pas la variable θ .

Lenoir *et al.* (1999) ont montré que le maintien de l'angle β constant pouvait permettre d'expliquer les régulations comportementales opérées pour intercepter un mobile. Nous le rappelons, lors d'une tâche d'interception, l'angle β est formé au point d'observation par la position du mobile à intercepter et la direction du déplacement de l'agent. Si le taux de changement de cet angle est nul, c'est-à-dire s'il est constant au cours du temps, alors l'interception est assurée. Sans savoir où et quand exactement, l'agent interceptera le mobile en étant au bon endroit au bon moment s'il maintient cette relation particulière avec l'environnement (*Figure 2.3.2.a*). Il s'agit bien d'une stratégie prospective efficace pour réaliser une tâche comme l'interception. Le taux de changement de β ($d^1\beta/dt^1$) constituerait un invariant optique pertinent pour les tâches d'interception. Si le taux de changement est négatif, cela signifie que l'angle β se ferme, diminue, et qu'alors le mobile franchira l'axe de déplacement de l'agent devant lui. Donc

il faut accélérer pour annuler ce taux de changement. A l'inverse, si le taux de changement est positif, alors l'angle s'ouvre, s'agrandit, l'agent est en avance et risque de dépasser le futur point d'arrivée du mobile s'il ne ralentit pas. $d^1\beta/dt^1$ est donc une variable optique qui spécifie l'état du système agent-environnement en informant sur l'état de la situation à l'instant t , mais il informe aussi sur les régulations du mouvement à opérer pour réussir la tâche.

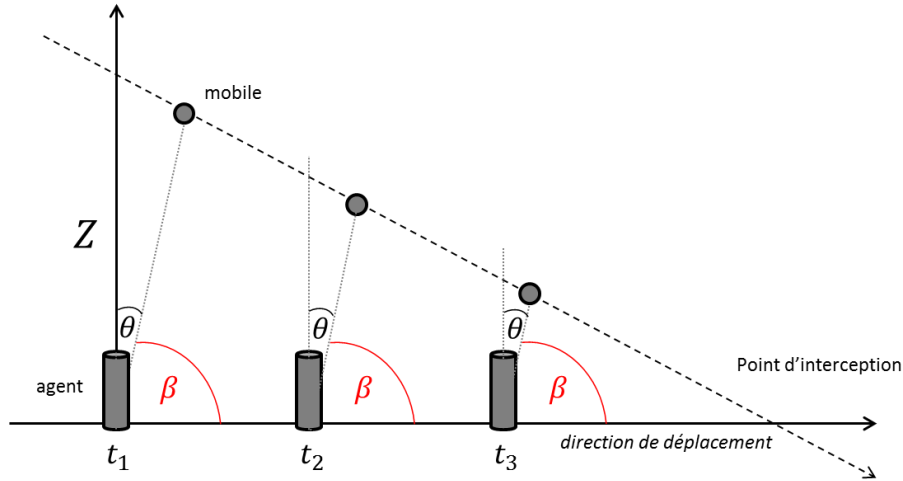


Figure 2.3.2.a : Représentation d'un contrôle de l'action basé sur l'annulation du taux de changement de β ($d^1\beta/dt^1$) garantissant l'interception future du mobile.

La stratégie *CTHA*, quand elle s'applique aux mouvements d'interception contraints sur axe, impose comme variable d'action la vitesse de déplacement plutôt que l'orientation du déplacement par l'agent (Fajen et Warren, 2007). Lenoir *et al.* (1999) ont démontré expérimentalement qu'il existait une relation directe entre les régulations comportementales (changements de vitesse) produites par les participants à l'étude et le taux de changement de β ($d^1\beta/dt^1$). Pour une valeur positive de la variable $d^1\beta/dt^1$, les participants décéléraient, pour une valeur négative, ils accéléraient. La stratégie *CTHA* explique que le contrôle de l'action se fait en annulant le taux de changement de l'angle β . Pour une action d'interception contrainte, Chardenon *et al.* (2004, 2005) ont formalisé cette stratégie en loi de contrôle :

$$\frac{d^2X}{dt^2} = -k \frac{d^1\beta}{dt^1}$$

où k est un paramètre spécifique au système agent-environnement étudié, et d^2X/dt^2

est l'accélération caractérisant les régulations du mouvement opérées par l'agent. Cette loi intègre le concept de couplage perception-action avec une variable informationnelle $d^1\beta/dt^1$ qui spécifie l'état du système et permet le contrôle de l'action en opérant les régulations comportementales vers son annulation (notons que $-k(d^1\beta/dt^1) = +k(d^1\theta/dt^1)$). Si le taux de changement est nul, la loi stipule une accélération nulle, l'agent doit alors maintenir sa vitesse pour intercepter le mobile. La littérature relative à la stratégie *CTHA* ne fait pas apparaître de débat quant à la question de l'initiation du mouvement de l'agent.

La stratégie *CTHA* corrobore les hypothèses de Fajen et Warren (2007) en suggérant que le contrôle du mouvement pour intercepter un mobile serait basé sur l'annulation de l'information de premier ordre $d^1\theta/dt^1$. Jusqu'ici, nous avons vu que la littérature laissait émerger deux types de variable informationnelle susceptible d'expliquer les régulations du mouvement lors de l'interception d'un mobile : une information d'ordre zéro avec la variable $d^0\theta/dt^0$ (ou $d^0\beta/dt^0$), le contrôle de l'action serait alors assuré par son annulation (ramené θ à zéro)^f; ou le contrôle de l'action se ferait par l'annulation d'une information de premier ordre, la variable $d^1\theta/dt^1$ ($d^1\theta/dt^1 = d^1\beta/dt^1 - d^1\phi/dt^1$) pour la stratégie d'interception classique.

Mais la littérature montre aussi que des travaux ont été entrepris afin de savoir si une information de second ordre pouvait influencer le contrôle de l'action, définissant un troisième type de stratégie : la stratégie *OAC* (*Optical Acceleration Cancellation*).

b. La stratégie OAC

Chapman (1968) a proposé une stratégie perceptivo-motrice afin d'intercepter des mobiles empruntant des trajectoires paraboliques dans le plan sagittal de l'agent. Ici, les déplacements de l'agent sont contraints sur l'axe longitudinal. Chapman (1968) a proposé que l'accélération optique de la balle au point d'observation était une variable optique capable de guider les régulations de vitesse à opérer pour réussir ce type d'interception (interception sur un axe longitudinal, voir *Figure 2.3.2.b*). En effet, une accélération optique nulle du mobile assure l'interception d'une balle suivant une trajectoire parabolique. Si c'est effectivement le cas, et que l'agent est immobile,

^f Pour le cas d'une interception sur un axe contraint, la stratégie de poursuite classique consiste à se positionner selon la position latérale du mobile jusqu'à ce que celui-ci franchisse l'axe de déplacement.

l'information spécifique à l'agent qu'il se situe au futur point d'interception ; s'il est en mouvement, l'information spécifique qu'il doit maintenir sa vitesse de déplacement pour intercepter la balle. Si ce n'est pas le cas, deux états du système sont possibles. Une accélération optique négative indique à l'agent immobile qu'il est placé en arrière du point de chute de la balle et qu'il faut qu'il avance pour réussir l'interception. A un agent déjà en train d'avancer vers le futur point de chute, elle indique qu'il doit accélérer. Une accélération optique positive indique à l'inverse qu'il est placé en avant par rapport au point de chute (s'il est immobile), et qu'il faut qu'il recule. Et s'il déjà en train de reculer, il faut qu'il accélère. L'accélération optique de la balle sur un plan de projection relatif au point d'observation de l'agent est la variable informationnelle pour réussir l'interception.

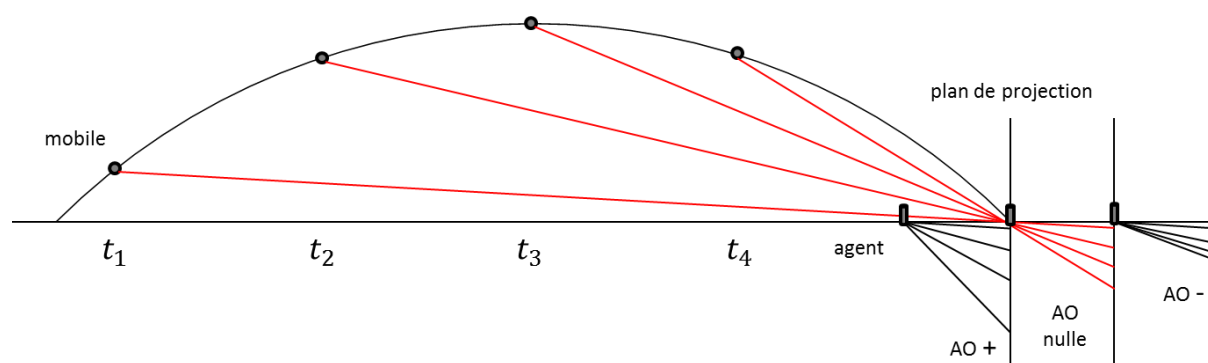


Figure 2.3.2.b : Représentation du système agent-environnement pour une stratégie d'interception par annulation de l'accélération optique (AO) de la balle au point d'observation informant sur l'état du système et le mode d'action à entreprendre.

L'utilisation de cette information permet le contrôle de l'action en spécifiant l'état du système agent environnement et le comportement à adopter pour réussir la tâche. Cette stratégie est elle aussi de nature prospective car il s'agit de créer une relation spécifique à l'environnement et de la maintenir pour intercepter le mobile sans avoir besoin de prédire le futur point d'interception, et démontre encore un peu plus la richesse du concept de couplage perception-action (McLeod et Dienes, 1996 ; Michaels et Oudejans, 1992 ; Zaal et Michaels, 2003).

Ces travaux suggèrent la possibilité du contrôle de l'action d'interception par une stratégie basée sur l'annulation d'une information de second ordre, l'annulation de l'accélération optique au point d'observation. Les hypothèses de Fajen et Warren (2007)

et celles développées par la stratégie *CTHA* se sont basées sur des trajectoires de mobiles rectilignes, donc sans accélération. Il est donc logique que ces hypothèses se soient orientées vers la possibilité de l'utilisation d'information d'ordre zéro ou de premier ordre. Une question légitime serait celle de la possible utilisation d'une information de second ordre pour intercepter des trajectoires courbées, donc avec accélération latérale.

En résumé, la littérature montre que trois types de stratégie pourraient être mis en œuvre pour intercepter un mobile en se déplaçant sur un axe (orientation fixe): une stratégie de contrôle d'ordre zéro basée sur l'annulation de la variable optique $d^0\theta/dt^0$, une autre de premier ordre basée sur l'annulation de la variable optique $d^1\theta/dt^1$, et une troisième de second ordre basée sur l'annulation de la variable optique $d^2\theta/dt^2$. Il s'agit d'une question à laquelle il nous faudra là aussi répondre avec ce travail de thèse, en examinant le potentiel explicatif respectif de ces trois types de stratégie. Cela passera par l'étude expérimentale du mouvement d'interception locomotrice (contraint sur un axe latéral) pour des trajectoires de mobiles rectilignes et curvilignes (cf. Chapitre 6).

La littérature sur le mouvement d'interception latérale manuelle fait apparaître un débat quant à la variable SAE responsable des régulations de ce mouvement (XB_0 ou XB_1). Cette problématique se rapproche de celle déjà développée avec les trois stratégies possibles pour comprendre l'interception locomotrice. La littérature fait émerger des positionnements différents, et il faudra, avec ce travail de thèse, apporter des éléments de réponse et nous positionner à notre tour. Nous venons de faire un état de la littérature des modèles du mouvement d'interception. Il s'en dégage deux types : les modèles d'interception latérale manuelle basés sur l'annulation de la distance entre la main et une variable SAE (XB_0 spécifiée dans le plan transverse par une variable informationnelle d'ordre nul, la variable optique $cal * \theta/\varphi$; ou XB_1 spécifiée dans le plan transverse par une variable informationnelle de premier ordre, la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$) ; les modèles d'interception locomotrice basés sur l'annulation d'une variable optique ($d^0\theta/dt^0$, $d^1\theta/dt^1$ ou $d^2\theta/dt^2$). L'objectif de ce travail de thèse est donc d'apporter des éléments de réponse pour comprendre les différentes prises de position qui ont émergées des travaux antérieurs en prenant garde de dissocier les notions conceptuelles relatives aux deux types de tâche d'interception étudiés. Ainsi, l'étude du mouvement d'interception manuelle se limitera à l'observation expérimentale d'interception de mobiles empruntant des trajectoires rectilignes (afin de comprendre les influences respectives des variables SAE XB_0 et XB_1). Alors que l'étude du

mouvement d'interception locomotrice permettra l'observation des comportements moteurs pour l'interception de mobiles ayant des trajectoires rectilignes et curvilignes (afin de déterminer laquelle des trois variables informationnelles potentielles, $d^0\theta/dt^0$, $d^1\theta/dt^1$ ou $d^2\theta/dt^2$, serait la plus pertinente pour expliquer les régulations de mouvement observées).

2.4. Compendium

Les tâches d'interception fournissent un paradigme d'études expérimentales pertinent pour comprendre les mécanismes sous-jacents au contrôle de l'action. En effet les contraintes spatio-temporelles inhérentes à ce type d'action (être au bon endroit au bon moment) permettent une analyse précise des stratégies perceptivo-motrices mises en œuvre par l'agent. L'étude de ces stratégies peut être faite selon deux niveaux : un premier niveau fonctionnel et un deuxième relatif à la question de l'implémentation (Bootsma, 1998, voir *Figure 1.1.3.a-b*). Ce travail de thèse s'axera uniquement sur la compréhension des régulations du mouvement à un niveau fonctionnel, c'est-à-dire à l'étude du cycle information-mouvement engagé lors de la réalisation d'une d'interception. Le fait d'inscrire ce travail dans le cadre théorique de l'approche écologique est un choix épistémologique qui a été argumenté dans le premier chapitre de cette partie introductive (Chapitre 1). L'étude d'actions visuellement guidées requiert une compréhension globale du système agent-environnement. La théorie de la perception directe propose un ensemble de concepts permettant de souscrire à ces volontés conceptuelles.

Une description de l'état de la littérature nous a permis de constater qu'il existait plusieurs modèles explicatifs des comportements perceptivo-moteurs potentiellement engagés lors de l'interception d'un mobile (Chapitre 2). Deux types de modèle ont été distingués : les modèles de contrôle du mouvement d'interception locomotrice construits sur l'annulation de la distance entre le point d'observation et une variable SAE ; les modèles de contrôle du mouvement d'interception latérale manuelle construits sur l'annulation de la distance entre la main et une variable SAE. Il est important, et nous nous efforcerons d'être le plus explicite possible, d'appréhender les différences intrinsèques des modèles construits pour les deux types d'interception que nous

étudierons (locomotrice et manuelle).

Pour le contrôle du mouvement d'interception locomotrice contraint en orientation, trois types de stratégie ont été suggérés dans la littérature : une première basée sur l'annulation d'une information d'ordre zéro exprimée par la variable optique $d^0\theta/dt^0$ (stratégie de poursuite classique) ; une autre basée elle sur l'annulation d'une information de premier ordre avec la variable optique $d^1\theta/dt^1$ (stratégie d'interception classique) ; et une troisième basée sur l'annulation d'une information de second ordre avec la variable optique $d^2\theta/dt^2$ (stratégie OAC). Un des objectifs de ce travail est de se positionner quant à la stratégie qui semble être la plus pertinente. Nous avons réalisé pour cela une étude expérimentale où les participants incarnaient un gardien de but immergé dans un stadium virtuel et devaient intercepter des trajectoires rectilignes et curvilignes dans le plan transverse (Chapitre 6). Dans cette étude nous montrons qu'aucune des trois stratégies évoquées ne semble pouvoir expliquer seule le mouvement d'interception locomotrice. Nous proposons le concept d'information d'ordre intermédiaire (dérivée fractionnaire plutôt qu'entière) et nous montrerons comment ce concept permet d'expliquer de nombreux aspects du mouvement d'interception locomotrice (temps d'initiation, patrons cinématiques, comportements caractéristiques etc.).

Pour le contrôle du mouvement d'interception latérale manuelle, la littérature fait apparaître deux variables SAE susceptibles de guider le mouvement de la main : XB_0 ou XB_1 . Là aussi, il a fallu se positionner, ce que nous avons fait dans les deux premiers chapitres expérimentaux. Pour ces deux études les participants interagissaient avec une tablette graphique positionnée de façon fronto-parallèle plutôt que transversalement. Ce choix a notamment été fait afin de vérifier si les comportements systématiques rapportés par les travaux antérieurs sur l'interception latérale manuelle de trajectoires dans un plan transverse pouvaient aussi être observés dans le cas d'interception de trajectoires dans le plan fronto-parallèle. De plus, ce choix nous assurait de pouvoir générer des trajectoires parfaitement rectilignes et tester ainsi l'influence de la variable SAE XB_1 (alors constante au cours du temps et commune à toutes les trajectoires avec le même point d'arrivée). Le premier des deux chapitres (Chapitre 4) montre que ni XB_0 ni XB_1 ne peuvent expliquer seules les patrons cinématiques de la main pour l'interception de mobiles virtuels empruntant des trajectoires rectilignes dans le plan fronto-parallèle. Ces patrons sont effet caractérisés par un effet systématique de l'angle d'approche. Avec

le chapitre suivant (Chapitre 5), toujours relatif au mouvement d'interception latérale manuelle, nous démontrons que le concept d'ordre intermédiaire peut s'appliquer aux variables SAE suggérant un continuum de stades possibles entre XB_0 et XB_1 . Nous montrerons avec un modèle de vitesse requise incluant la variable SAE $XB_{0.8}$ comment il est possible d'expliquer l'effet systématique de l'angle d'approche sur les patrons cinématique de la main, le temps d'initiation, ainsi que l'éventualité d'observer des mouvements de rebroussements, qui en soi est un débat dans la littérature (Montagne *et al.*, 1999 ; Dessing *et al.*, 2002 ; Jacobs et Michaels, 2006 ; Michaels *et al.*, 2006 ; Arzamarski *et al.*, 2007 ;).

Ainsi, nous cherchons à démontrer dans cette thèse la puissance explicative du concept d'ordre intermédiaire aux ordres entiers au moyen de deux modèles distincts mais recouvrant la même logique conceptuelle quant aux interactions agent-environnement. Finalement ces interactions sont formalisées différemment selon si l'on étudie le mouvement d'interception latérale locomotrice ou si l'on étudie le mouvement d'interception latérale manuelle. Le modèle de contrôle de l'interception latérale locomotrice est basé sur l'annulation d'une information d'ordre fractionnaire ($d^\alpha \theta / dt^\alpha$) alors que le modèle de contrôle de l'interception manuelle est basé sur l'annulation de la distance entre la main et la variable SAE (XB_α). Les chapitres expérimentaux (Chapitres 4, 5 et 6) apporteront les premiers éléments de preuve de nos hypothèses. Chacune des trois études, bien que précédée d'une synthèse en français, sera retranscrite sous sa forme publiée (Chapitres 4 et 6) ou en préparation (Chapitre 5), c'est-à-dire en anglais.

Mais au préalable, le dernier chapitre de cette première partie (Chapitre 3), détaille la méthodologie générale qui a été utilisée pour réaliser les études expérimentales et les raisons qui nous amené à utiliser la méthode de la réalité virtuelle.

3. Méthodologie générale

La méthode qui a été choisie est la celle de la réalité virtuelle car elle présente plusieurs avantages. Tout d'abord la possibilité de confronter tous les participants aux mêmes conditions expérimentales afin de dégager ce qui relève des comportements communs et ce qui relève des différences interindividuelles. Nous avons fait le choix de consacrer notre travail à ce qui relève des comportements communs susceptibles d'être expliqué par les propriétés de l'environnement qui guident l'action. Ensuite la réalité virtuelle permet une plus grande liberté expérimentale quant à l'élaboration des conditions qui seront présentées aux participants.

3.1. Présentation des dispositifs expérimentaux

3.1.1. La Tâche d'interception manuelle (chapitres expérimentaux 4 et 5)

Le mouvement d'interception latérale manuelle est un déplacement contraint sur un axe latéral où seule la main de l'agent est en mouvement. Le point d'observation est donc considéré comme fixe. Nous avons fait le choix de présenter des mobiles à intercepter dont le déplacement se faisait dans un plan fronto-parallèle. Ceci nous a permis d'étudier des trajectoires parfaitement rectilignes. Le but était d'apporter des éléments de réponse au débat relatif à la variable SAE responsable des régulations du mouvement d'interception. Nous avons exposé précédemment les limites intrinsèques que pouvait comporter un protocole expérimental présentant des trajectoires pendulaires. Ce choix nous assurait que la variable SAE XB_1 serait constante au cours du temps et communes à toutes les trajectoires rectilignes ayant le même point d'arrivée mais un angle d'approche différent. De plus, aucun travaux n'avait encore étudié l'interception de mobiles empruntant des trajectoires dans un plan fronto-parallèle, ce choix nous a alors

aussi de vérifier si les comportements systématiques rapportés par la littérature (études de trajectoires pendulaires ou dans le plan transverse) pouvaient se généraliser encore un peu plus.

Pour cela, les participants interagissaient avec une tablette graphique *Cintiq 21UX* (Wacom®) avec un écran intégré de 43,2 centimètres en largeur et 32,4 centimètres en hauteur. L'interaction avec l'environnement virtuel généré sur la tablette se faisait au moyen d'un stylet. Celui-ci devait être maintenu sur un axe latéral défini situé au bas de l'écran. Un effecteur virtuel signifiait sur l'écran la position du stylet sur l'axe d'interception. L'environnement virtuel était conçu et généré au moyen du logiciel *ICE* développé par Cédric Goulon de l'*Institut des Sciences du Mouvement Etienne-Jules Marey*. Les participants devaient intercepter sur leur axe de déplacement des balles virtuelles traversant l'écran de haut en bas selon différentes trajectoires et différentes vitesses.

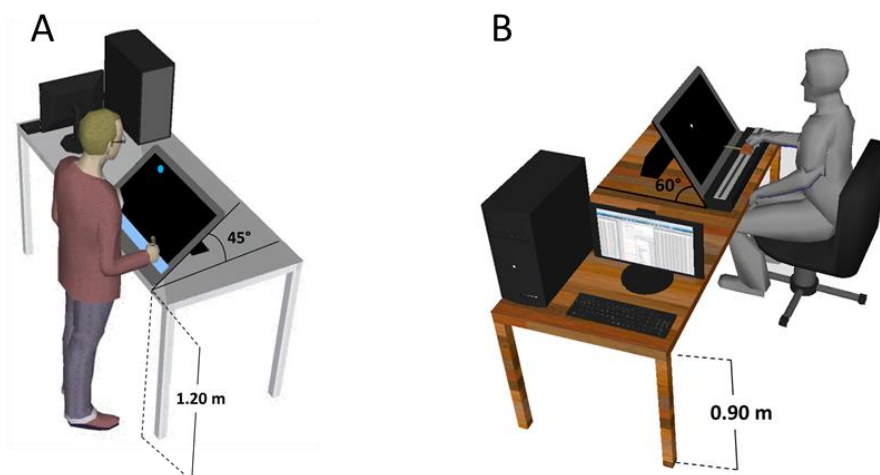


Figure 3.1.1 : Illustration des dispositifs expérimentaux mis en place pour les deux premières études (Chapitres 4 et 5, respectivement dispositifs A et B).

3.1.2. La Tâche d'interception locomotrice (chapitre expérimental 6)

Pour étudier le mouvement d'interception locomotrice, nous avons aussi choisi de contraindre les déplacements des participants sur un axe latéral. Cependant, ici la totalité du corps de l'agent est en mouvement. Le point d'observation est donc lui aussi en mouvement. L'expérience a été réalisée dans le *Cave* du Centre de Réalité Virtuelle de la Méditerranée (crvm.ism.univ-amu.fr). Ce dispositif propose quatre surfaces de

projection, chacune asservie par deux projecteurs : un plan au sol mesurant 3*3 mètres ; trois plans verticaux mesurant 4 (hauteur) sur 3 (largeur) mètres en configuration théâtre (voir *Figure 3.1.2*). Cette configuration permettait aux participants de se déplacer latéralement sur une longueur de 7,2 mètres. La génération de l'environnement virtuel en trois dimensions (permettant la stéréoscopie visuelle) était assurée par la technologie *Infitec*®. Les lunettes stéréoscopiques portées par les participants étaient équipées de marqueurs réfléchissants. Huit caméras *ART*® enregistraient en temps réels les déplacements de la tête des participants par détection des marqueurs. La scène visuelle s'actualisait à une fréquence de 60 Hertz, en prenant en compte les mouvements de la tête des participants au regard de l'environnement virtuel. Utilisant là encore le logiciel *ICE* pour concevoir et générer l'environnement virtuel, nous avons simulé un stade de football. Les participants prenaient place au milieu d'un but de taille réglementaire (7,32 mètres de large pour 2,44 mètres de hauteur). Ils devaient intercepter des ballons virtuels de dimension conventionnelle (22 centimètres de diamètres) empruntant des trajectoires rectilignes et curvilignes.

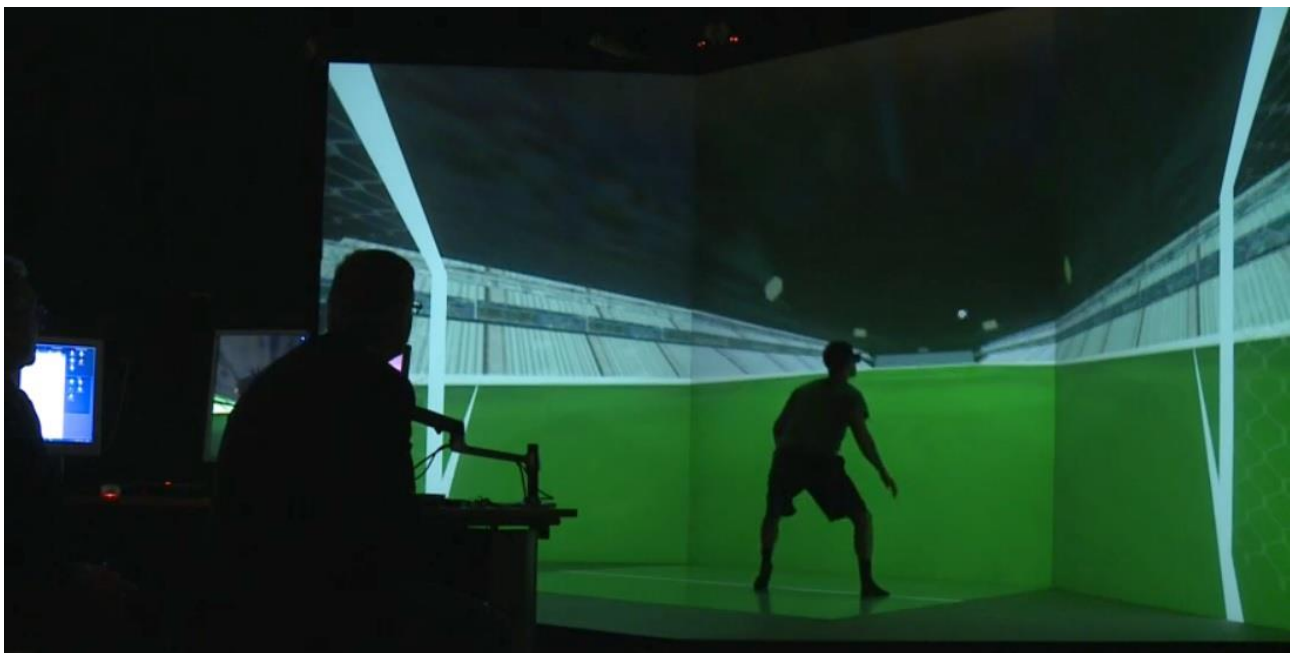


Figure 3.1.2 : Illustration du dispositif expérimental utilisé pour la troisième étude.

3.2. Scénarii expérimentaux

Les trois scénarii expérimentaux utilisés dans les trois études seront détaillés dans les chapitres expérimentaux.

3.3. Acquisition et analyse des données

Pour les trois études l'acquisition et l'analyse des données se sont faites selon le même mode de fonctionnement modulo de légères modifications. Le logiciel *ICE* enregistrait en temps réel (fréquence d'échantillonnage : 100 Hz) la position spatiale du mobile virtuel et celle du participant. Durant la conception du scénario expérimental nous avons la possibilité de programmer l'enregistrement d'autres variables comme la distance mobile-agent à chaque pas de temps, le succès ou l'échec de l'interception etc. Le recueil de l'ensemble des données d'une étude expérimentale prenait le format d'un fichier contenant autant de documents *.txt* qu'il y avait d'essais enregistrés. Ces documents étaient alors convertis en fichier *.mat* afin de pouvoir être analysés sous Matlab, le logiciel de programmation et de traitement de données utilisé pour la réalisation de ce travail. Dans une première partie, il a permis l'analyse des données dans leur ensemble en traitant simultanément plusieurs milliers d'essais. Dans une deuxième partie, il a permis la simulation des modèles de la littérature ainsi que le développement des deux modèles dynamiques que nous proposons, pour les deux types d'interception (manuelle ou locomotrice), dans les chapitres expérimentaux 5 et 6.

Tableau 3.3 : Paramètres spécifiques de l'acquisition des données pour les trois études expérimentales.

	Etude 1	Etude 2	Etude 3
Fréq éch.	100 Hz	100 Hz	100 Hz
Filtrage	2 nd order Butterworth	2 nd order Butterworth	2 nd order Butterworth
Cut-off	5 Hz	5 Hz	3 Hz
Référentiel	(x, y)	(x, y)	(x, y, z)
Rayon du mobile	0.008 m	0.008 m	0.11 m

4. L'effet persistant de l'angle d'approche

4.1. Positionnement de l'étude

Nous nous sommes intéressés dans cette première étude expérimentale à l'interception latérale manuelle de mobiles se déplaçant dans le plan fronto-parallèle. La question était de comprendre laquelle des deux variables SAE XB_0 ou XB_1 expliquait au mieux les régulations du mouvement, ses variables SAE étant les deux variables qui ont émergées de la littérature dans les différents modèles de contrôle du mouvement pour l'interception latérale manuelle. Pour répondre à cette question, nous avons demandé aux participants d'intercepter des mobiles virtuels empruntant des trajectoires rectilignes. Pour ce type de trajectoire, la variable SAE XB_1 est un attracteur positionnel constant au cours du temps et commun à toutes les trajectoires avec le même point d'arrivée. Si (une variable informationnelle spécifiant) XB_1 était la variable responsable des régulations du mouvement, alors aucune différence cinématique ne devait être observée pour les régulations des mouvements de la main relatives aux différentes conditions partageant le même point d'interception. Or, dans l'étude menée un effet d'angle d'approche sur les régulations du mouvement de la main a été observé. Arzamarski *et al.* (2007), qui ont rapporté les mêmes résultats pour des déplacements de mobiles réels dans le plan transverse, ont expliqué cet effet d'angle d'approche par l'existence d'un biais dans la perception de XB_1 . En utilisant la même méthode expérimentale (extrapolation de segments statiques) nous avons montré que nous pouvions contrôler ce biais et construire des trajectoires sans biais perceptif. Pourtant l'effet d'angle d'approche a continué d'être observé avec ces nouvelles trajectoires. Cette étude nous a amené à reconsidérer l'influence de la variable XB_0 car elle montre que XB_1 ne peut pas expliquer seule les régulations du mouvement de la main pour intercepter des mobiles avec des trajectoires rectilignes.

4.2. Manuscrit de l'étude

Introduction

Success in interceptive actions requires getting to the right place at the right time Peper et al. (1994). Although the organization of interception movements may be based on accurate perceptual estimates of the future place and time of contact, a large body of work provides convincing evidence for a more robust alternative, based on a continuous, functional coupling between information and movement. Here we will refer to the former type of organization as predictive control and to the latter as prospective control (Peper et al., 1994; Bootsma, 1997; Bootsma, 2009; Gray et al., 2009). Consensus has emerged over the last two decades limiting the operation of predictive control to explosive movements of short duration (Brenner et al., 1998; Zago et al., 2004; Tresilian et al., 2005; Zago et al., 2005; Tresilian et al., 2006; Bootsma et al., 2010; Van Soest et al., 2010). For interceptive movements of sufficiently long duration, actions are characterized by the pursuit of particular states of the agent-environment interaction that guarantee (i.e., are lawfully related to) the future achievement of the goal. Thus, in a prospective control scheme the unfolding movement is based on time-evolving information with respect to what the agent must do so as to ensure interception, without requiring precise knowledge of when and where this will occur. While prospective strategies have been documented for locomotor (whole-body displacement) interception tasks, both in humans (Michaels & Oudejans, 1992; McBeath et al., 1995; McLeod & Dienes, 1996; McLeod et al., 2003; Chardenon et al., 2004; Chardenon et al., 2005; Fajen & Warren, 2007; Bastin et al., 2010) and animals (Lanchester & Mark, 1975; Shaffer et al., 2004; Ghose et al., 2006; Olberg, 2006), here we concentrate on manual (lateral) interception.

Peper et al. (1994) were the first to demonstrate systematic differences in the kinematic patterns of hand movement when participants caught balls following different trajectories converging onto the same interception location and arriving there after the same flight duration. This angle-of-approach effect is incompatible with a movement control strategy based on accurately predicted place and time of contact because these were invariant over the different trajectories. Although the influence of the ball's motion

trajectory on the kinematics of interception movements has been replicated on several occasions (Montagne et al., 1999; Dessing et al., 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007; Dessing et al., 2009; Dessing & Craig, 2010), the nature of the information underlying the prospective control of lateral interception is still subject of debate. While differing in dynamical structure, all existing models of prospective control of lateral interception (Peper et al., 1994; Bootsma et al., 1997; Dessing et al., 2005; Michaels et al., 2006; Dessing & Craig, 2010; Dessing et al., 2002) are based on the idea that the hand is continuously attracted toward an informationally-specified, time-evolving position along the interception axis. A first controversy exists as to whether this hand-attractor position is based on the projection of the current lateral position of the ball onto the interception axis (Peper et al., 1994; Bootsma et al., 1997; Dessing et al., 2005; Dessing et al., 2002) (informationally-specified zero-order variable XB_0 , see *Figure 4.1*) or on the lateral position where the ball will cross the interception axis if its current direction of motion is maintained (Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007; Dessing & Craig, 2010) (informationally-specified firstorder variable XB_1 , see *Figure 4.1*).

As can be seen from *Figure 4.1*, for a rectilinear ball trajectory the ball's current projected position XB_0 continuously varies during the approach to the interception point. Moreover for different rectilinear ball trajectories converging onto the same position on the interception axis, XB_0 evolves in a different way. On the other hand, the future passing position XB_1 is the same and remains invariant throughout the approach for all rectilinear ball trajectories converging onto the same interception position. Thus, the kinematic patterns of hand movement produced when participants intercept balls following different rectilinear trajectories converging onto the same interception position was hypothesized to allow experimental discrimination between these two candidate information sources (Peper et al., 1994; Bootsma et al., 1997). Finding an angle-of-approach effect under these conditions would challenge accounts based on the use of XB_1 -based information.

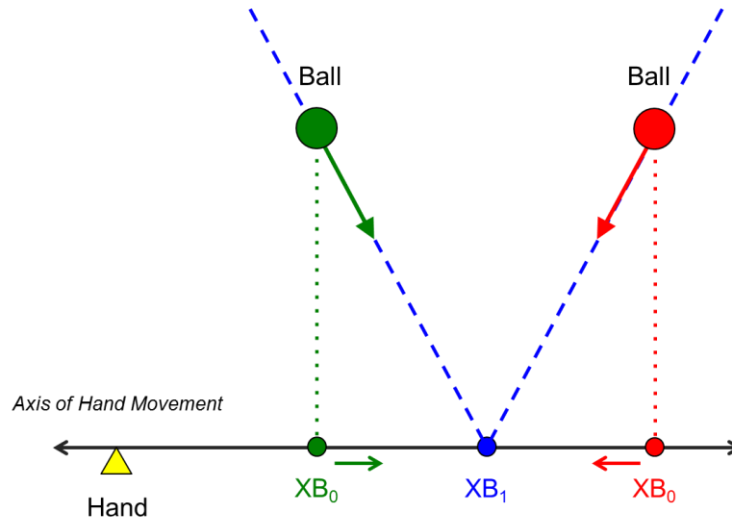


Figure 4.1. Definition of variables. XB_0 is the current lateral position of the ball projected orthogonally on the interception axis (axis of hand movement). XB_1 is the future lateral position of the ball on the interception axis if current heading is maintained. Balls (green and red circles) moving along rectilinear trajectories (dashed blue lines) with constant velocity (fat green and red arrows) will cross the axis of hand movement at position XB_1 (blue circle). For balls moving in the observer's transverse plane with the point of observation located on the axis of hand movement, optical specification is defined in angles of ball eccentricity (θ) and ball size (ϕ). In this case, XB_0 and XB_1 are optically specified, in units of ball size, by $\sin\theta/\tan\phi$ and $(d\theta/dt)/(d\phi/dt)$, respectively. For balls moving in a plane perpendicular to the observer's line of sight (present study) with the point of observation located at an orthogonal distance D from the axis of hand movement, optical specification is defined in angles of ball azimuth (α) and ball elevation (ε). For small angles, distances XB_0 and XB_1 are optically specified, in units of distance D , by α and $\alpha + \varepsilon(d\alpha/dt)/(d\varepsilon/dt)$, respectively.

In a study using rectilinear ball trajectories, Montagne et al. (1999) did find a systematic angle-of-approach effect on the kinematics of lateral catching movements. This finding led them to reject the use of XB_1 -based information and to conclude in favour of the use of XB_0 -based information. However, Arzamarski et al. (2007) recently questioned this interpretation, thereby initiating a second controversy. They suggested that participants would in fact use XB_1 -based information but that perceptual biases herein were responsible for the angle-of-approach effect. To provide evidence for the existence of such biases in perceived future ball crossing position, they examined

participants' performance on a line-intersection extrapolation task. In this task, line segments (conceived as static representations of segments of rectilinear ball trajectories) were to be extrapolated to the intersection with a second line (corresponding to the axis of hand movement). Participants' estimates of the intersection position revealed systematic errors across line-segment orientations to and distances from the axis of hand movement. These perceptual biases identified in the static line-intersection extrapolation task were interpreted as providing evidence in favour of perceptual biases in the detection of XB_1 -based information in the dynamic interception task (Arzamarski et al., 2007).

In the present contribution we experimentally tested whether perceptual biases observed in a line-intersection extrapolation task can really explain the angle-of-approach effects observed in lateral interception. To this end, we set out to experimentally construct a set of ball-motion trajectories for which the perceptual bias with respect to the ball's future arrival position was controlled to be effectively zero at each point of each trajectory. If a systematic angle-of-approach effect were still to be observed when intercepting balls moving along these bias-controlled trajectories, this would disqualify the perceptual bias explanation proposed by Arzamarski et al. (2007). As a consequence, the existing body of results would not be compatible with the exclusive use of XB_1 -related information in the prospective control of lateral interception (Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007; Dessing & Craig, 2010).

Because we used a new experimental interception setup with virtual balls moving in a plane perpendicular to the participant's line of sight, we proceeded in four steps. In Experiment 1 we sought to replicate the angle-of-approach effect on interception movements, generally observed for balls moving in the participants' transverse plane (Peper *et al.*, 1994; Montagne et al., 1999; Dessing et al., 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007). Rectilinear ball trajectories converging onto the same interception locations gave rise to reliably different, trajectory-dependent patterns of interceptive hand movement. The angle-of-approach effects observed in Experiment 1 were equivalent to those reported in the literature, thereby validating our new experimental setup for the interception task. In Experiment 2 we sought to replicate the perceptual biases reported by Arzamarski et al. (2007). We had participants perform the line-intersection extrapolation task used by Arzamarski et al. (2007) in our new experimental setup. To this end, we replaced the moving balls of

Experiment 1 with static line segments, corresponding to segments of the rectilinear ball trajectories that these balls had followed. Participants' estimations of the intersection locus of these line segments with the axis of hand movement revealed systematic errors: Biases varied with the orientation of the line segments to and their distance from the axis of hand movement. The pattern of result was equivalent to that reported by Arzamarski et al. (2007), thereby also validating our experimental setup for the line-intersection extrapolation task.

In Experiment 3 we tested whether the systematic nature of biases identified in Experiment 2 could be used to control participants' estimates of the intersection locus in the line-intersection extrapolation task. Based on the relation of the biases observed with segment orientation and distance, we generated a new set of (slightly curved) trajectories that were all characterized by a predicted zero-bias with respect to the future arrival position, at each point in the trajectory. Estimates of the intersection locus for line segments derived from these new trajectories no longer revealed systematic errors, demonstrating that it was indeed possible to control for bias in the line-intersection extrapolation task. Finally, in Experiment 4, we had participant intercept balls moving along these bias-controlled trajectories. The angle-of-approach effect on the kinematics of interception movements observed Experiment 1 for rectilinear ball trajectories still emerged when participants intercepted balls moving along the bias-controlled trajectories. The present series of experiments thereby provides compelling evidence against the perceptual bias explanation for angle-of-approach effects in lateral interception.

Experiment 1: Intercepting balls moving along rectilinear trajectories

The goal of this first experiment was to validate a new experimental setup for lateral interception of virtual balls moving in a plane perpendicular to the participant's line of sight. To this end we sought to replicate the angle-of-approach effect on interception movements, generally observed for balls moving in the participants' transverse plane (Peper et al., 1994; Montagne et al., 1999; Dessing et al., 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007).

Ethics Statement. For this, as for the subsequent experiments reported in the present contribution participants provided written consent prior to participation. The study was

approved by the local institutional review board (IRB) of the Institute of Movement Sciences (*Comité Ethique de l'Institut des Sciences du Mouvement d'Aix-Marseille Université*) and conducted according to University regulations and the Declaration of Helsinki.

Materials and Methods

Participants. Five right-handed participants (2 men and 3 women, mean age 26.6 ± 5.5 yrs) voluntarily took part in the experiment.

Task and Procedure. The experiment took place in a darkened room without windows. The participant stood in front of an interactive Cintiq 21UX Wacom® tablet (screen size 43.2*32.4 cm, 1600*1200 pixel resolution) positioned at a height of 1.20 m and oriented at a 45° angle, providing a plane of motion perpendicular to the participant's line of sight (see *Figure 4.2*). The task was to intercept simulated balls moving downward (top-to-bottom) across the tablet's screen by laterally displacing a hand-held stylus. To this end, participants moved the stylus along the top edge of a transparent, 5-cm wide plastic ruler, horizontally fixed to the tablet at the level of the bottom of the screen.

The interception axis was represented on the screen by a horizontal, 0.05-cm wide, blue line. Stylus position, sampled at a frequency of 100 Hz, was indicated by a vertical, 0.1-cm wide, white line cursor centred on the interception axis.

Before the onset of a trial the participant positioned the stylus cursor on the designated starting point, located at the centre of the interception axis. This point was used to define the X-Y origin of the screen, X increasing negatively to the left and positively to the right of the starting position and Y increasing positively to the top of the screen. When the stylus cursor was correctly positioned at the starting position, a ball, represented by a 0.8-cm diameter white circle against a black background, appeared at one of the five possible departure positions ($Y = +32$ cm; $X = -14, -7, 0, +7, \text{ or } +14$ cm). After remaining stationary for 3 s, the ball moved at constant velocity across the screen towards one of five possible arrival positions along the interception axis ($Y = 0$ cm; $X = -14, -7, 0, +7, \text{ or } +14$ cm).

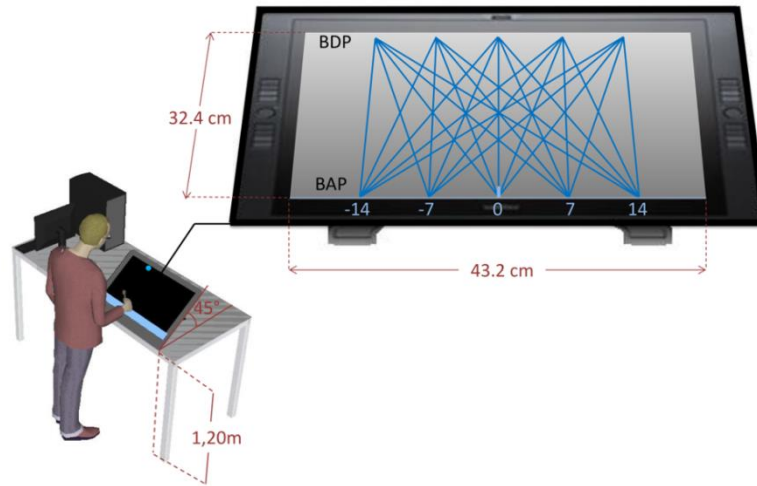


Figure 4.2: Representation of the experimental set-up. Starting from a fixed initial position (represented here by a vertical light blue line segment positioned at BAP = 0 cm) participants moved the hand-held stylus along the (horizontal) interception axis to intercept virtual balls moving from one of five Ball Departure Positions (BDP) to one of five Ball Arrival Positions (BAP).

Combining the five departure positions and the five arrival positions gave rise to 25 different rectilinear ball trajectories. Balls could move at vertical (Y) speeds of 20 or 32 cm/s, for motion durations of 1.6 or 1.0 s. Participants performed 5 blocks of 50 trials, with the order of the 50 conditions (25 trajectories * 2 ball speeds) randomized over trials within each block. Feedback with respect to interception (yes/no) was automatically provided at the end of each trial, with successful interception requiring that the distance between stylus and ball was less than 0.45 cm (half the sum of ball diameter and cursor width).

During the experiment, ball and stylus positions were sampled at a frequency of 100 Hz and stored on disk for each individual trial. Before data analysis the stylus position time-series were filtered using a second-order Butterworth filter with a cut-off frequency of 5 Hz (Peper et al., 1994; Montagne et al., 1999; Arzamarski et al., 2007; Bootsma & Van Wieringen, 1990).

Data analysis. Interception performance was assessed using constant error, defined as the distance between ball and stylus position at the moment the ball crossed the interception axis. General trends in movement kinematics were captured in ensemble

averages of the time series of position and velocity of stylus displacement. In order to statistically test differences in movement kinematics, we analysed (i) the position of the stylus at 400 ms before the ball crossed the interception axis and (ii) peak velocity of the stylus movement. The effect of approach trajectory on the pattern of interceptive movement was visible almost immediately after the start of the movement. The same qualitative pattern of results was found for stylus position at time-to-contacts (TTC) of 600, 400, and 200 ms.

All dependent variables—Constant Error, Stylus Position at TTC= 400 ms, and Peak Velocity—were submitted to repeated measures Analyses of Variance (ANOVA) with factors Ball Speed (2 levels), Ball Departure Position (5 levels), and Ball Arrival Position (5 levels). Where appropriate significant ($p < .05$) main effects and interactions were further analysed using Newman-Keuls post-hoc tests.

Results

For each ball arrival position the five different ball departure positions corresponded to five different angles of approach (five different trajectories) to the same interception point. As can be seen from the ensemble averages of stylus position and velocity over time (*Figure 4.3*), participants hardly moved the stylus when the ball would arrive at the stylus starting position ($X = 0$ cm). For all other ball arrival positions ($X = -14, -7, +7, +14$ cm) systematic effects of ball departure position (and hence angle of approach) were observed. These angle-of-approach effects were corroborated by the statistical analyses of kinematic characteristics of the movement patterns described below.

Performance. Interception performance was quite good, with 84.3% of the balls being intercepted. Overall, Constant Error was -0.02 ± 0.57 cm. The ANOVA on Constant Error revealed significant main effects of Ball Speed ($F(1, 4) = 177.56, p < .001$), Ball Departure Position ($F(4, 16) = 10.36, p < .001$) and Ball Arrival Position ($F(4, 16) = 13.78, p < .001$). Inspection of the data revealed that the effects were mainly due to a larger (negative) Constant Error for the Ball Arrival Position = -14 cm (Ball Departure Positions = +14, +7, 0 cm) conditions with lower ball speed. As can be seen from *Figure 4.3*, these effects were quite modest.

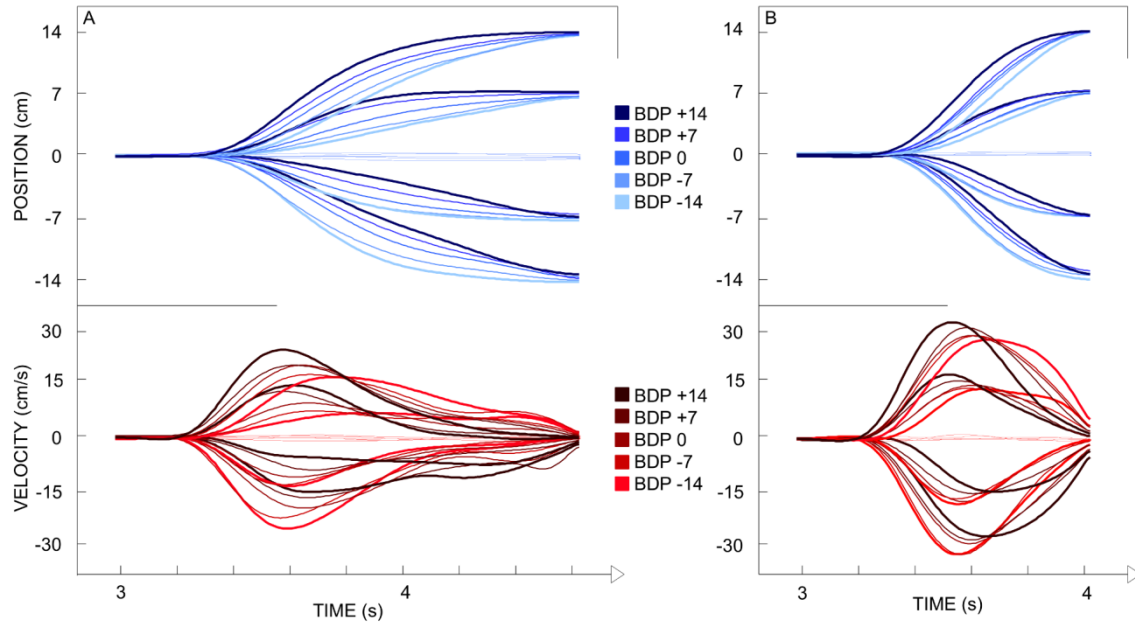


Figure 4.3: Ensemble averages of stylus position and velocity as a function of time (Exp. 1). The ball started moving 3 s after its appearance (t_0) on the screen. BDP: Ball Departure Position. Panel A: lower ball speed. Panel B: higher ball speed.

Movement kinematics. The ANOVA on the stylus position at TTC= 400 ms (Pos-400) revealed significant main effects of Ball Departure Position ($F(4, 16)= 61.34, p<.001$) and Ball Arrival Position ($F(4, 16)= 1018.91, p<.001$), as well as significant first-order interactions for Ball Speed * Ball Arrival Position ($F(4, 16) =183.96, p<.001$) and Ball Departure Position * Ball Arrival Position ($F(16, 64)= 6.18, p<.001$). Post-hoc analysis of these effects brought out the following points (see *Figure 4.4*). Overall, Pos-400 was further away from the starting position for (a) balls moving at the lower speed (all $ps<.05$) and (b) balls moving towards farther arrival positions (all $ps<.05$). The Ball Departure Position * Ball Arrival Position interaction indicated that for each arrival position Pos-400 varied systematically with the ball's angle of approach (at least two significant ($p<.05$) Ball Departure Position comparisons at each Ball Arrival Position, except for Ball Arrival Position = 0 cm). The larger the (absolute) angle of approach, the further the stylus was from the future ball arrival position. The effect of angle of approach was observed for both ball speeds.

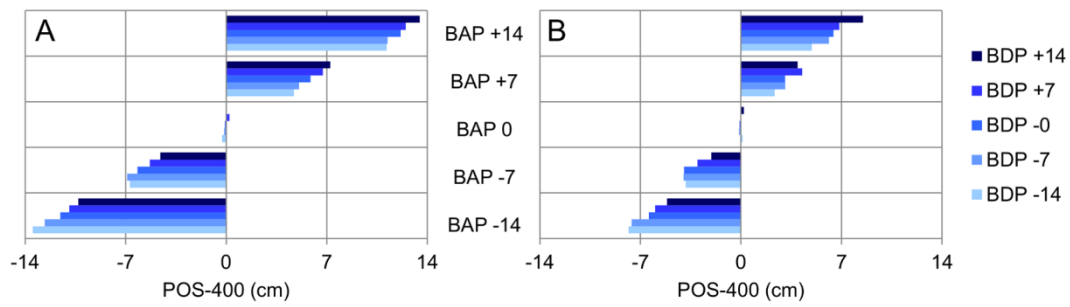


Figure 4.4: Pos-400 as a function of BDP and BAP (Exp. 1). Pos-400: Stylus position at 400 ms before the ball reached the interception axis. BDP: Ball Departure Position. BAP: Ball Arrival Position. Panel A: lower ball speed. Panel B: higher ball speed.

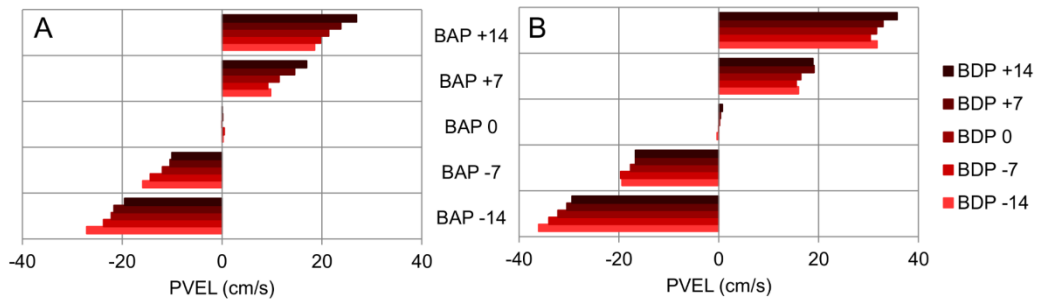


Figure 4.5: PVel as a function of BDP and BAP (Exp. 1). PVel: Peak Velocity. BDP: Ball Departure Position. BAP: Ball Arrival Position. Panel A: lower ball speed. Panel B: higher ball speed.

The ANOVA on Peak Velocity revealed significant main effects of Ball Departure Position ($F(4, 16) = 34.57, p < .001$) and Ball Arrival Position ($F(4, 16) = 373.58, p < .001$) as well as significant first-order interactions for Ball Speed * Ball Arrival Position ($F(4, 16) = 182.19, p < .001$) and Ball Departure Position * Ball Arrival Position ($F(16, 64) = 2.85, p < .001$). Post-hoc analysis of the interactions revealed several points (see Figure 4.5). First, Peak Velocity was systematically larger when the distance between the initial stylus position and the Ball Arrival Position was larger (all $ps < .05$). Second, for each combination of Ball Departure Position and Ball Arrival Position, Peak Velocity was systematically larger when the ball moved faster (all $ps < .05$). Finally, for each Ball Arrival Position, Peak Velocity systematically varied with Ball Departure Position (at least one significant Ball Departure Position comparison at each Ball Arrival Position, except for Ball Arrival Position = 0 cm), with smaller Peak Velocities being attained for

ball trajectories with larger (absolute) angles of approach. This angle-of-approach effect was observed for both ball speeds.

Discussion

The general characteristics of the movement patterns observed, such as higher peak velocities when larger distances were to be covered and higher peak velocities when balls moved faster, correspond to those reported in earlier studies of interception (Peper *et al.*, 1994; Brenner *et al.*, 1998; Montagne *et al.*, 1999; Dessing *et al.*, 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels *et al.*, 2006; Arzamarski *et al.*, 2007; Fayt *et al.*, 1997; Brouwer *et al.*, 2005). Moreover, as in the earlier lateral interception studies (Peper *et al.*, 1994; Montagne *et al.*, 1999; Dessing *et al.*, 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels *et al.*, 2006; Arzamarski *et al.*, 2007), systematic effects of the angle of approach of the ball's trajectory to the interception point were observed. Finally, the absence of hand movement when balls moved rectilinearly towards the initial hand position replicated the results reported by Arzamarski *et al.* (2007). Overall, these results thus validate our new experimental set-up for lateral interception of virtual balls moving in a plane perpendicular to the participant's line of sight.

Experiment 2: Line-intersection extrapolation for rectilinear trajectories

Studying lateral interception of balls rolling-along rectilinear trajectories-across a table top, Arzamarski *et al.* (2007) reported a pattern of results that, on all points, closely resembles the results of our Experiment 1. They argued that the observed angle-of-approach effect need not be interpreted as revealing the influence of information with respect to current lateral ball position (XB_0). Rather, they suggested that this effect would stem from perceptual biases in establishing XB_1 . To demonstrate the existence of such perceptual biases in perceived future ball crossing position Arzamarski *et al.* (2007) evaluated performance on a line-intersection extrapolation task. Using our new experimental setup, in Experiment 2 we adopted the same methodology in order to replicate their findings and to identify the characteristics of such biases.

Materials and Methods

Participants. Ten right-handed participants (6 men and 4 women, mean age 21.7 ± 1.7 yrs) voluntarily took part in the experiment. None of them had participated in Experiment 1.

Task and Procedure. The experimental set-up was the same as in Experiment 1, with the exception of one characteristic. Instead of laterally intercepting balls moving across the screen, participants were now asked to point to the position on the interception axis that corresponded to its intersection with a static line segment presented on the screen. Stylus position was recorded when participants marked the intersection position by pushing down the stylus. The line segments corresponded to parts of the 25 rectilinear trajectories used in Experiment 1. Four segments with a standardized 6-cm vertical (Y) extent were extracted from each trajectory, with the centre point of the segment corresponding to vertical (Y) distances from the interception axis of 3.0, 11.7, 20.3, or 29.0 cm. The segments centred on a vertical distance of 3.0 cm in fact touched the interception axis with their lowest points. They were used to ascertain that the pointing task itself did not introduce any supplementary biases.

A trial consisted of the presentation of a static line segment that remained visible until the participant marked the perceived intersection position. Participants performed 5 blocks of 100 trials, with the order of the 100 conditions (4 distances * 25 trajectories) randomized over trials in each block. No feedback was provided.

Data analysis. Performance of intersection locus estimation was assessed using Constant Error, defined as the distance between the required position (corresponding to the ball arrival position of the matching trajectory) and the marked stylus position. In order to allow a comparison with the results of Experiment 3 the line segments extracted from each of the 25 trajectories were characterized by their orientation with respect to the axis of hand movement. The 25 combinations of ball departure and arrival positions gave rise to 9 Segment Orientations (-41.2 , -33.3 , -23.6 , -12.3 , 0.0 , 12.3 , 23.6 , 33.3 , and 41.2°). Using a repeated measures ANOVA, we evaluated the effects on Constant Error of the factors Segment Distance (4 levels) and Segment Orientation (9 levels).

Results and Discussion

The line-intersection extrapolation task revealed a systematic, distance-dependent influence of segment orientation on the perceived location of the intersection with the axis of hand movement (*Figure 4.6*). Perceptual biases were analysed using the errors in intersection location estimation induced by segment orientation at different distances from the axis of hand movement.

The ANOVA on Constant Error in estimated intersection locus revealed a significant main effect of Segment Orientation ($F(8, 72) = 11.59, p < .001$) and a Segment Orientation * Segment Distance interaction ($F(24, 216) = 17.82, p < .001$). As can be seen from *Figure 4.6*, the interaction indicated that Segment Orientation gave rise to systematic effects on Constant Error for the segments at larger distances from the interception axis. Post-hoc analysis of the interaction indicated that Constant Error was not affected by Segment Orientation for the 3.0 and 11.7-cm segment distances (all p s $< .10$). For these two segment distances Constant Error remained close to zero with linear regression slopes of $+0.0013$ cm/deg ($r(23) = +.75, p < .001$) and -0.0001 cm/deg ($r(23) = -.02, ns$), respectively. While the correlation between Constant Error and Segment Orientation was significant for the 3.0-cm segment distance, the slope of the relation indicated that this effect was negligible for the present purposes: a 45° -variation in Segment Orientation was associated with a change in Constant Error of less than 0.05 cm. For the 20.3 and 29.0-cm segment distances, however, Constant Error considerably varied with Segment Orientation, with the largest effect for the 29.0-cm segment distance (all p s $< .05$). Linear regression of Constant Error onto Segment Orientation demonstrated slopes of -0.0418 cm/deg ($r(23) = -.98, p < .001$) and -0.0661 cm/deg ($r(23) = -.98, p < .001$) for the 20.3-cm and 29.0-cm segment distances, respectively. For these latter distances the slopes were important, as a 45° -variation in Segment Orientation gave rise to changes in Constant Error in intersection locus estimates of 1.88 and 2.98 cm, respectively.

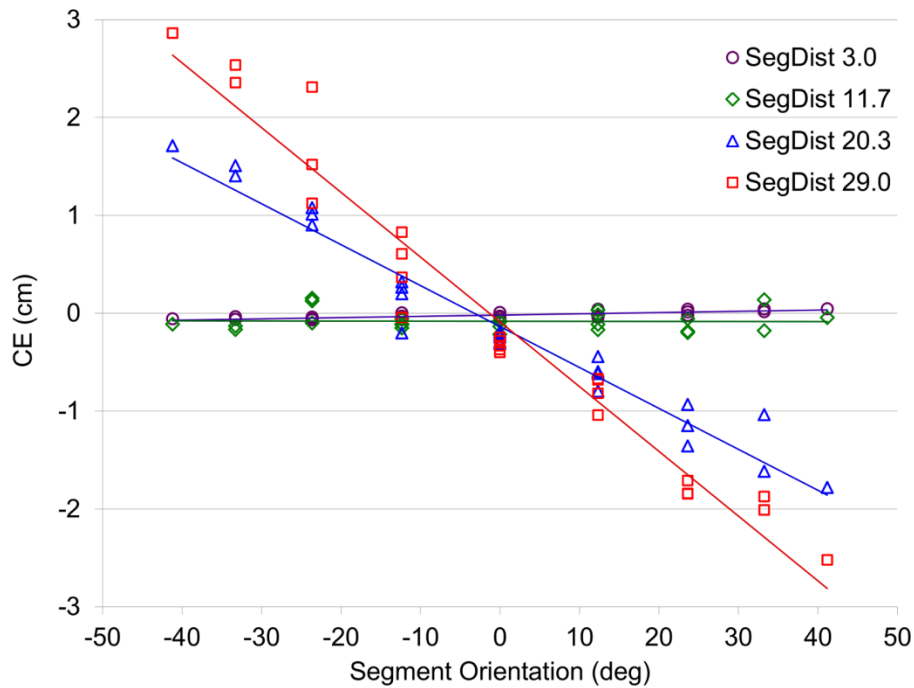


Figure 4.6: *CE for intersection extrapolation as a function of segment orientation for the 4 segment distances (Exp. 2). CE: Constant Error. SegDist: Segment Distance.*

Overall, Experiment 2 reliably replicated the pattern of results reported by Arzamarski et al. (2007). The static line-intersection extrapolation task revealed errors in the estimated intersection locus that varied as a function of the distance from the axis of hand movement and the orientation of the segment presented. The systematic errors observed for the larger segment distances when the segment's orientation deviated from 0° (i.e., from perpendicular to the participant's movement axis) correspond to the perceptual biases referred to by Arzamarski et al. (2007). Thus, Experiment 2 validated our experimental setup for studying perceptual biases in the line-intersection extrapolation task.

Experiment 3: Line-intersection extrapolation for bias-controlled trajectories

The goal of Experiment 3 was to test whether the systematic nature of the errors in estimated intersection locus observed in Experiment 2 could be used to control such perceptual biases. In other words, we sought to determine whether we could create a set of trajectories with zero perceptual bias with respect to the future ball arrival position at

each point in each trajectory. To this end, we mathematically characterized the constant error (CE) in intersection locus estimates observed in Experiment 2 as a continuous function of Segment Distance (SegDist) and Segment Orientation (SO). For the two largest segment distances, we fitted the equation $CE = k_1 + k_2 \cdot SO + k_3 \cdot \text{SegDist} + k_4 \cdot SO \cdot \text{SegDist} + k_5 \cdot SO^2 + k_6 \cdot \text{SegDist}^2 + k_7 \cdot SO^2 \cdot \text{SegDist} + k_8 \cdot SO \cdot \text{SegDist}^2$. For the two closest segment distances, we considered CE to be equal to zero. The equation was not intended to provide any kind of generic model; it simply served to capture the effects observed as closely as possible. The fit accounted for 87.0% of the total variance, for a mean error of estimation of 0.06 cm. The resulting coefficients (CE in cm; SO in degrees) were 0.57346, -0.05680, 1.63140, 0.67885, 0.58676, 0.00134, 0.01601, and 0.00409 for k_1 to k_8 , respectively.

Trajectories with a model-predicted zero bias with respect to the future ball arrival position at each point were constructed in the following way. The first point on each trajectory was, of course, the ball departure position. For this point we selected the segment orientation that corresponded to a real intersection position shifted away from the trajectory's ball arrival position by a distance equal to the perceptual bias predicted for this segment orientation at this distance from the axis of hand movement. By matching the shift in the real intersection location to the predicted error in its estimate, the predicted error with respect to the future ball arrival position was zero. Linear extrapolation of the bias-controlled trajectory orientation over a Y-distance of 0.1 cm provided the X-Y coordinates of the next point. The full trajectory was constructed by iterating the procedure. Examples of bias-controlled trajectories thus constructed are provided in *Figure 4.7*.

To test the validity of this bias-control logic, in Experiment 3 we again used the line-intersection extrapolation task. Our specific goal was to determine whether the newly constructed bias-controlled trajectories gave rise to (sufficiently precise) estimations of intersection locus that were no longer systematically biased.

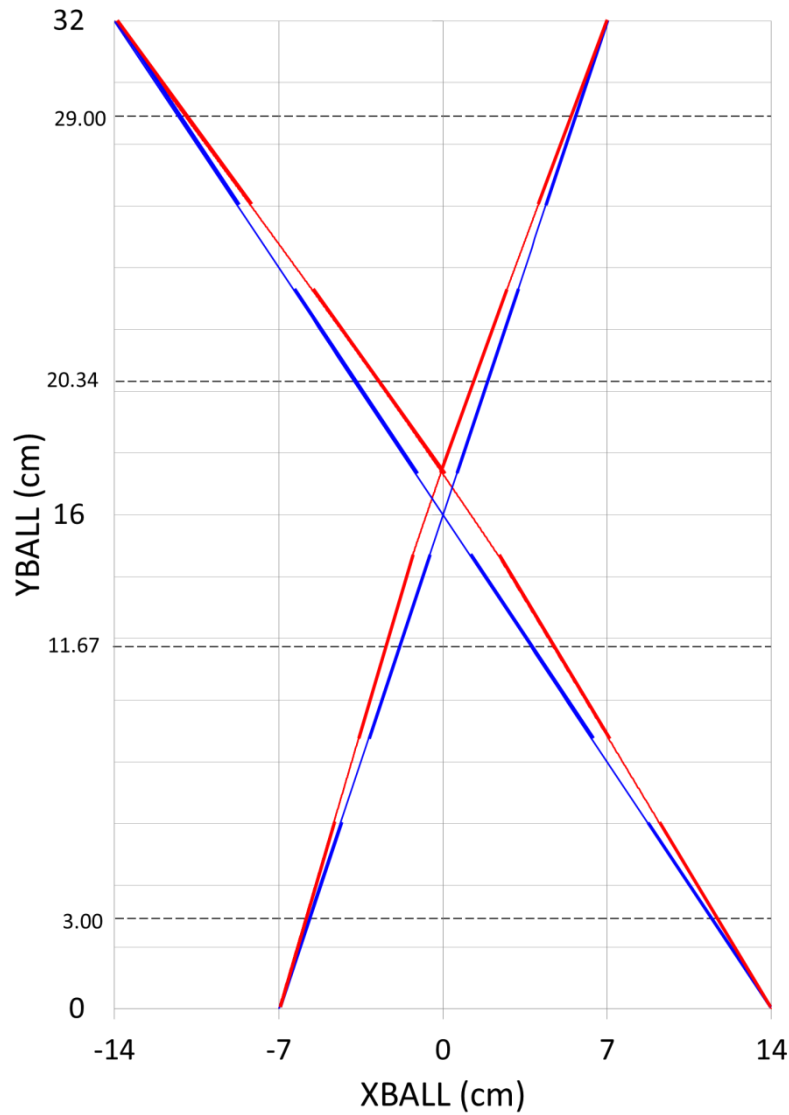


Figure 4.7: Examples of rectilinear and corresponding biascontrolled trajectories. Rectilinear trajectories for interception (Exp. 1, thin blue lines) and line segments for intersection-extrapolation (Exp.2, thick blue line segments). Bias-controlled trajectories for interception (Exp. 4, thin red lines) and line segments for intersection-extrapolation (Exp. 3, thick red line segments). The exemplary trajectories shown are $BDP = 214$ cm to $BAP = +14$ cm and $BDP = +7$ cm to $BAP = 27$ cm.

Materials and Methods

Participants. Fifteen right-handed participants (9 men and 6 women, mean age 21.7 ± 1.8 yrs) voluntarily took part in the experiment. Six of them had participated in Experiment 2.

Task, Procedure, and Data Analysis. The experimental set-up was the same as in Experiment 2, with the exception of one characteristic. Instead of using segments from the rectilinear trajectories, the segments' position and orientation were extracted at the same four vertical distances as in Experiment 2 from the newly-created bias-controlled trajectories joining the same five ball departure positions to the same five ball arrival positions. Participants performed 5 blocks of 100 trials, with the order of the 100 conditions (4 distances * 25 trajectories) randomized over trials in each block. No feedback was provided. Because segment orientations (SO) were adapted for each trajectory they could no longer be categorised into 9 levels, as was the case in Experiment 2. Therefore, as had already been done in Experiment 2, we evaluated the slope of the linear CE-SO relation for each segment distance.

Results and Discussion

As can be seen from *Figure 4.8*, the bias-control model allowed removing the systematic effect of segment orientation observed in Experiment 2. Constant Error in estimated intersection locus was less than 0.5 cm in all conditions. Linear regression slopes of the CE-SO relation were -0.0009, +0.0008, -0.0046, +0.0045 cm/deg for segment distances of 3.0, 11.7, 20.3, and 29.0 cm, respectively. Thus, notwithstanding the statistical significance of the CE-SO correlations for three of the four segment distances ($r(23)=-.50, +.18, -.56, +.41$, respectively), the variation in CE over a 45°-range of SO was always less than 0.2 cm. Such very small variations in CE were considered negligible for the present purposes. Another argument for neglecting such small slopes is the (difficult to explain) sign change of the (statistically significant) slopes for the 3.0-cm segment distance observed in Experiments 2 and 3.

Thus, the bias-control model allowed us to considerably reduce the pointing errors produced by the participants and, most importantly, to remove the systematic effects of Segment Orientation observed in Experiment 2 for the larger Segment Distances. We conclude that the bias-controlled trajectories are characterized by a (close to) zero perceptual bias at each point of each trajectory.

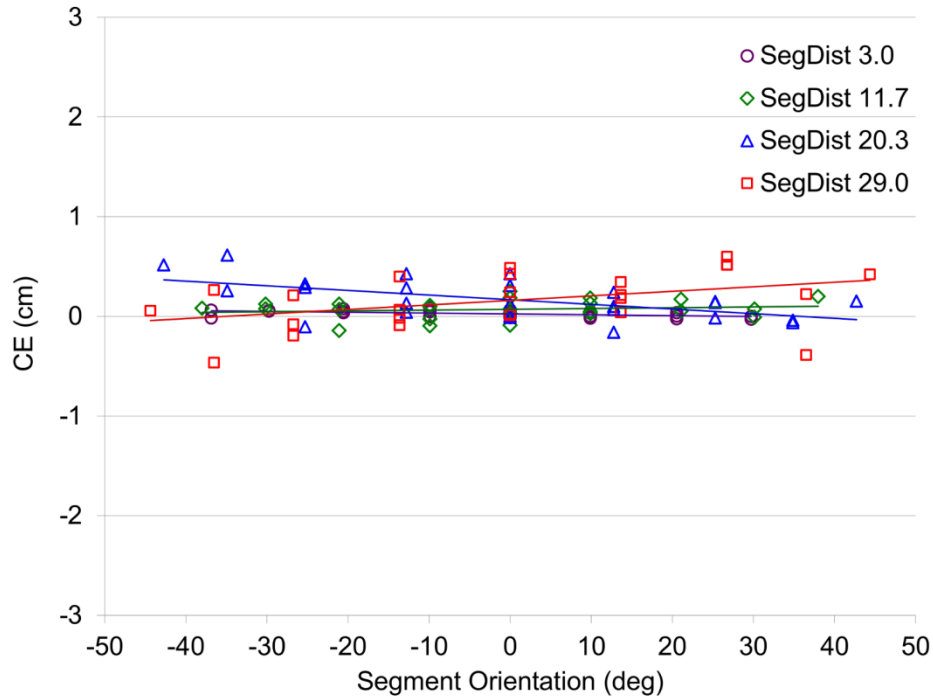


Figure 4.8: *CE for intersection extrapolation as a function of segment orientation for the 4 segment distances (Exp. 3). CE: Constant Error. SegDist: Segment Distance.*

Experiment 4: Intercepting balls moving along bias-controlled trajectories

Having established that the new set of trajectories effectively allowed controlling the perceptual bias, Experiment 4 tested whether the angle-of-approach effects observed in Experiment 1 would persist or vanish when intercepting balls moving along these bias-controlled trajectories. In the latter case, the angle-of-approach effect may indeed be ascribed to such biases (Arzamarski et al., 2007). In the former case, it cannot.

Materials and Methods

Participants. Eight right-handed participants (5 men and 3 women, mean age 21.6 ± 1.8 yrs) voluntarily took part in the experiment. All had participated in Experiment 3.

Task, Procedure, and Data Analysis. The task, procedure, and analyses of the data were identical to those of Experiment 1, the only difference residing in the characteristics of the ball trajectories used. The 25 rectilinear trajectories were replaced by the 25 new,

slightly curved trajectories, linking the same five ball departure positions ($Y = +32$ cm; $X = -14, -7, 0, +7, \text{ or } +14$ cm) and the same five ball arrival positions ($Y = 0$ cm; $X = -14, -7, 0, +7, \text{ or } +14$ cm). Each of these 25 trajectories was constructed on the basis of the bias-compensation model developed on the basis of the results of Experiment 2 and tested in Experiment 3. Thus, the line-intersection extrapolation error was controlled to be close to zero at each point along all these trajectories.

Results and Discussion

The ensemble averages of stylus position and velocity over time (*Figure 4.9*) indicated systematic effects of ball departure position for all ball arrival positions (with the exception of $X = 0$ cm). These angle-of-approach effects were corroborated by the statistical analyses of kinematic characteristics of the movement patterns described below. Thus, the angle-of-approach effect observed in Experiment 1 continued to emerge even when participants intercepted ball moving along the bias-controlled trajectories.

Performance. Interception performance was again quite good, with 90.1% of the balls being intercepted. Overall, Constant Error was -0.02 ± 0.64 cm. The ANOVA on Constant Error revealed a significant main effect of Ball Arrival Position ($F(4, 28) = 4.46, p < .01$) as well as a significant Ball Speed $\times$ Ball Arrival Position interaction ($F(4, 28) = 4.00, p < .05$). Post-hoc analysis of the interaction demonstrated that these effects were due to the higher Constant Error observed in the high ball speed condition for ball arrival position $= +14$ cm. As can be seen from *Figure 4.9*, these effects were again quite modest.

Movement kinematics. The ANOVA on Pos-400 revealed significant main effects of Ball Departure Position ($F(4, 28) = 57.80, p < .001$) and Ball Arrival Position ($F(4, 28) = 715.34, p < .001$), as well as significant first-order interactions for Ball Speed $\times$ Ball Departure Position ($F(4, 28) = 4.37, p < .01$), Ball Speed $\times$ Ball Arrival Position ($F(4, 28) = 119.61, p < .001$) and Ball Departure Position $\times$ Ball Arrival Position ($F(16, 112) = 8.61, p < .001$). Finally, the second-order interaction Ball Speed $\times$ Ball Departure Position $\times$ Ball Arrival Position was also significant ($F(16, 112) = 3.97, p < .001$). Post-hoc analysis of the overarching interaction brought out the following points (see *Figure 4.10*). Overall, Pos-

400 was further away from the starting position for (a) balls moving at the lower speed (all $ps < .05$) and (b) balls moving towards farther arrival positions (all $ps < .05$). For each arrival position Pos-400 varied systematically with the ball's angle of approach (at least two significant Ball Departure Position comparisons at each Ball Arrival Position, except for Ball Arrival Position = 0 cm). The smaller the (absolute) angle of approach, the closer the stylus was to the future ball arrival position. The effect of angle of approach was observed for both ball speeds.

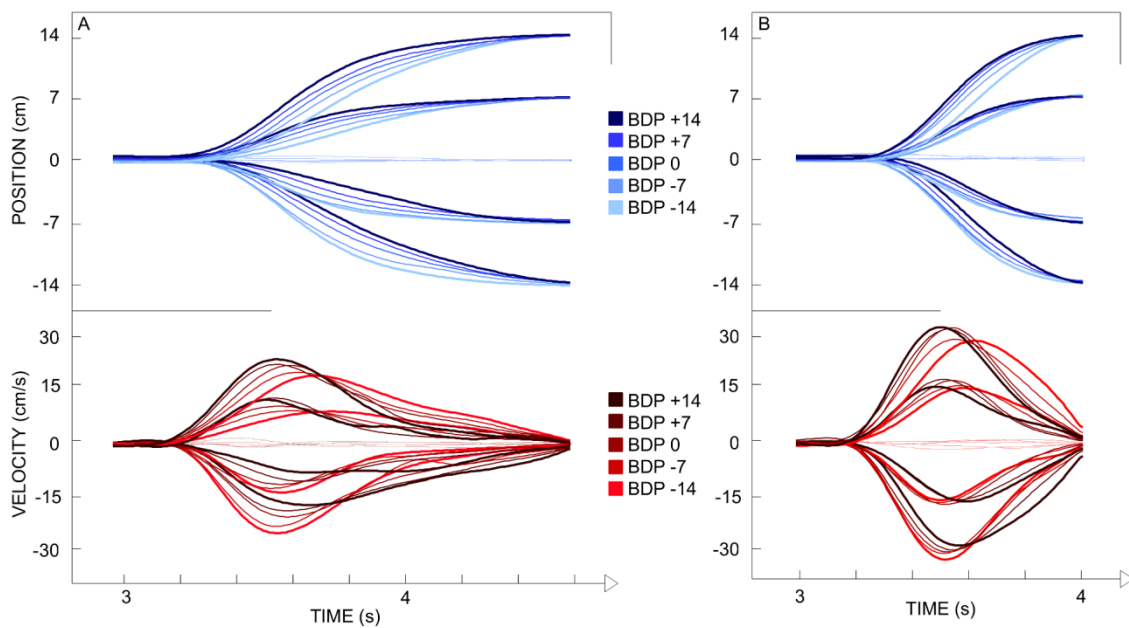


Figure 4.9: Ensemble averages of stylus position and velocity as a function of time (Exp. 4). The ball started moving 3 s after its appearance (t_0) on the screen. BDP: Ball Departure Position. Panel A: lower ball speed. Panel B: higher ball speed.

The ANOVA on Peak Velocity revealed significant main effects of Ball Departure Position ($F(4, 28) = 26.24$, $p < .01$) and Ball Arrival Position ($F(4, 28) = 254.43$, $p < .001$) as well as significant first-order interactions for Ball Speed $\times$ Ball Arrival Position ($F(4, 28) = 100.95$, $p < .001$) and Ball Departure Position $\times$ Ball Arrival Position ($F(16, 112) = 3.79$, $p < .001$). Post-hoc analysis of the interactions revealed the same effects (see Figure 4.11) as those observed in Experiment 1. First, Peak Velocity was systematically larger when the distance between the starting position and the ball arrival position was larger (all $ps < .05$). Second, for each combination of ball departure position and ball arrival position

Peak Velocity was systematically larger when the ball moved faster (all $ps < .05$). Finally, for each ball arrival position, Peak Velocity systematically varied with ball departure position (at least one significant Ball Departure Position comparison at each Ball Arrival Position, except for Ball Arrival Position = 0 cm), with smaller Peak Velocities being attained for ball trajectories with larger (absolute) angles of approach. This angle-of-approach effect was observed for both ball speeds.

The angle-of-approach effects on the kinematics of interception movements observed in Experiment 1 for rectilinear ball trajectories were still present when participants intercepted balls moving along the bias-controlled trajectories. We therefore conclude that such angle-of-approach effects cannot be (fully) ascribed to perceptual biases in detecting XB_1 -based information.

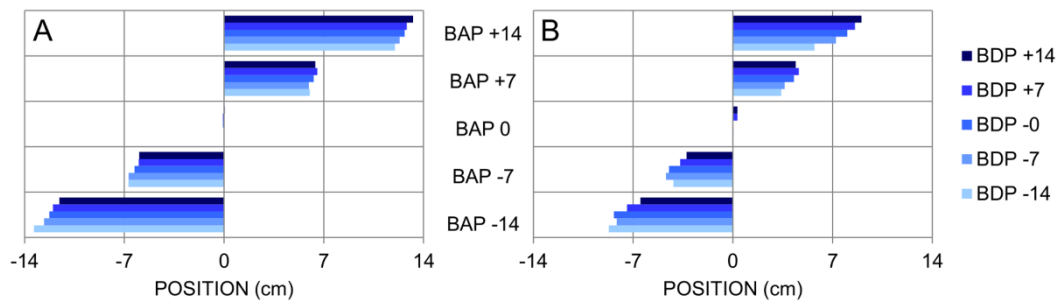


Figure 4.10: Pos-400 as a function of BDP and BAP (Exp. 4). Pos-400: Stylus position at 400 ms before the ball reached the interception axis. BDP: Ball Departure Position. BAP: Ball Arrival Position. Panel A: lower ball speed. Panel B: higher ball speed.

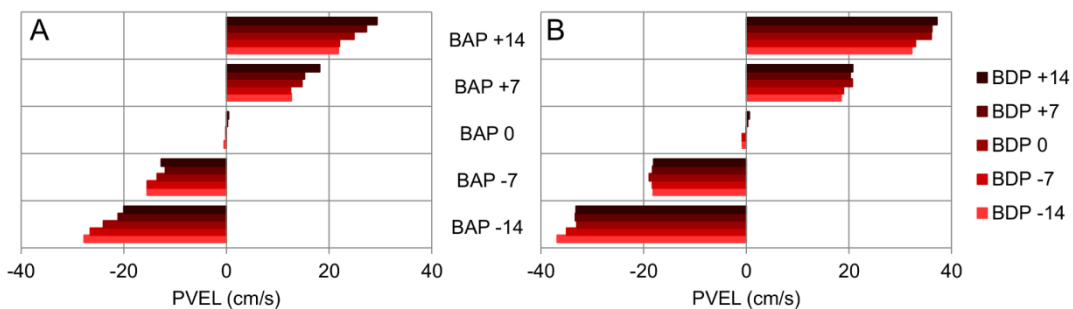


Figure 4.11: PVel as a function of BDP and BAP (Exp. 4). PVel: Peak Velocity. BDP: Ball Departure Position. BAP: Ball Arrival Position. Panel A: lower ball speed. Panel B: higher ball speed.

General Discussion

In the present series of experiments we addressed the control of lateral interception movements. In line with the literature (Peper et al., 1994; Montagne et al., 1999; Dessing et al., 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007), the pattern of interceptive hand movement varied when participants intercepted balls converging onto the same interception location, arriving there after the same ball motion duration while following different trajectories. This persistent angle-of-approach effect militates against a predictive control strategy and provides compelling evidence in favour of the organization of movement on the basis of prospective control.

In prospective-control models of lateral interception (Peper et al., 1994; Bootsma et al., 1997; Dessing et al., 2005; Michaels et al., 2006; Dessing & Craig, 2010; Dessing et al., 2002) the hand is continuously attracted toward an informationally-specified, time-evolving position along the interception axis. Controversy continues to exist with respect to the characteristics of the spatial information used: the two most prominent candidates are the current lateral ball position (XB_0 , Peper et al., 1994; Bootsma et al., 1997; Montagne et al., 1999; Dessing et al., 2005; Dessing et al., 2002) and the ball's future crossing position if the current direction of ball motion is maintained (XB_1 , Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007; Dessing & Craig, 2010). XB_1 is invariant over rectilinear ball trajectories while XB_0 is not (see *Figure 4.1*). The finding of systematic angle-of-approach effects in a study of lateral interception using rectilinear ball trajectories led Montagne et al. (1999) to conclude against the use of XB_1 -based information. However, Arzamarski et al. (2007) argued that the observed angle-of-approach effect resulted from participants using perceptually-biased XB_1 -based information.

The perceptual-bias explanation proposed by Arzamarski et al. (2007) was based on the inference that perceptual biases observed in a static line-intersection extrapolation task would generalize to the dynamic interception task. The present study was designed to test this perceptual-bias account of the angle-of-approach effect in lateral interception. To this end we developed a set of slightly curvilinear trajectories that effectively removed the perceptual biases that were held responsible for angle-of-approach effects by Arzamarski and colleagues. To generate ball motion along these bias-controlled trajectories we needed to rely on an interception task using virtual balls.

Thus, the first step of the present study was to validate our experimental setup for the lateral interception of virtual balls moving across the screen of a large-sized interactive graphics tablet (see *Figure 4.2*). This was achieved in Experiment 1 where participants intercepted balls moving along rectilinear trajectories from one of five departure positions on the top of the screen to one of five arrival positions at the bottom of the screen: We found clear angle-of-approach effects, replicating those known from previous studies (Peper et al., 1994; Montagne et al., 1999; Dessing et al., 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007). Next, we needed to validate the experimental setup for the line-intersection extrapolation task used by Arzamarski et al. (2007) to determine perceptual biases. This was achieved in Experiment 2 where participants estimated the (extrapolated) intersection locus of static line segments on the lateral-interception line: We found estimation errors (i.e., perceptual biases) similar to the ones reported by Arzamarski et al. (2007). These first two experiments thus validated our experimental setup for the present purposes.

The next step was to design and validate a new set of bias-controlled trajectories. Using the systematic nature of the perceptual biases observed on the line-intersection extrapolation task of Experiment 2, we derived a set of slightly curvilinear trajectories for which the estimated intersection locus continuously coincided with the arrival positions of the original rectilinear ball trajectories (see *Figure 4.7*). Experiment 3 demonstrated that our corrections for the perceptual biases had been successful: For line segments tangential to these trajectories participants' estimations of intersection locus was consistently close to the future ball arrival position. Thus, we were finally ready to test Arzamarski et al.'s (2007) perceptual-biases account for angle-of approach effects in lateral interception of balls traveling rectilinear trajectories. As in Experiment 1, in Experiment 4 we had our participants intercept balls moving from one of five departure positions to one of five arrival positions. Now, instead of rectilinear trajectories we used the bias-controlled trajectories. Our main finding was that the angle-of-approach effect persisted, also with trajectories that had been designed and tested to correct for perceptual biases. This result shows that perceptual biases are not responsible for the angle-of-approach effects reported here and in the literature (Peper et al., 1994; Montagne et al., 1999; Dessing et al., 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007). Because the perceptuomotor bias explanation (Arzamarski et al., 2007) of the angle-of-approach effect does not hold

under experimental scrutiny, the implication is that the on-line visual control of lateral interception is not based on information about XB_1 exclusively (Michaels et al., 2006; Arzamarski et al., 2007; Dessing & Craig, 2010).

We suggest that the present results indicate a combined use of information about XB_1 and XB_0 . That is to say, although a control based only on information about XB_1 was ruled out by the current study, an account based completely on information about XB_0 also seems untenable. Prospective control models based on information about XB_0 (Peper et al., 1994; Bootsma et al., 1997; Dessing et al., 2002) not only predict angle-of-approach effects. They also predict that balls that will eventually arrive at the hand's starting position should give rise to an initial hand movement away from the starting position, in the direction of the time-evolving XB_0 (see *Figure 4.1*). As XB_0 approaches the future interception location during the course of ball motion, hand movement should be reversed, with the ball finally being intercepted at the hand's initial position. Although Montagne et al. (1999) indeed reported such movement reversals, later studies, including the present, have not replicated these. At present we have no explanation for this discrepancy. The robust finding of small but systematic angle-of-approach effects is nevertheless compatible with the use of XB_0 -based information. However, the absence of systematic reversal movements militates against an exclusive use of XB_0 -based information. Thus, the control of lateral interception appears to be based on an informational quantity relating to both XB_0 and XB_1 . Interestingly, for participants placed in the role of a goalkeeper in football such a composite informational quantity was recently found to explain their judgements of whether a ball would enter the goalmouth or not (Craig et al., 2009). Models of prospective control based on such a composite informational variable need to be developed and their predictions tested in new experiments.

5. Interception latérale manuelle : Vers un contrôle basé sur une variable d'ordre intermédiaire

5.1. Positionnement de l'étude

Montagne *et al.* (1999) ont rapporté deux résultats importants quant au mouvement d'interception latérale manuelle : pour intercepter un mobile se déplaçant de façon rectiligne dans le plan transverse, ils ont observé un effet d'angle d'approche de la trajectoire sur le comportement cinématique de la main ainsi qu'un nombre non négligeable de mouvements de rebroussement (caractérisés par un changement de direction pendant l'action). A la différence de l'effet d'angle d'approche, ni l'étude d'Arzamarski *et al.* (2007), ni notre première étude n'a rapporté de mouvement de rebroussement. Dans cette deuxième étude, similaire à la première mais avec une augmentation de l'incertitude et de la difficulté de la tâche (augmentation du nombre de conditions dont certaines très difficile et diminution des repères environnementaux autres que le mobile), nous avons d'observé un taux non négligeable de mouvements de rebroussement (34%) pour des trajectoires rectilignes dont l'arrivée correspondait à la position initiale de la main des participants. Ni XB_1 (dont l'influence seule impliquerait l'absence totale de rebroussements) ni XB_0 (dont l'influence seule impliquerait des rebroussements systématiques) ne pouvait expliquer de façon satisfaisante la possibilité d'observer ce type de mouvement de façon occasionnelle. Ce constat nous a ainsi amené à proposer l'idée d'un contrôle du mouvement d'interception sur la base d'une variable d'ordre intermédiaire (plutôt qu'entier). Le développement d'un modèle dynamique sur la base de celui de Bootsma *et al.* (1997) incorporant une variable SAE d'ordre intermédiaire ($XB_{0.8}$) nous a alors permis de simuler (i) les différences de temps d'initiation du mouvement selon les caractéristiques de la trajectoire, (ii) l'effet d'angle d'approche ainsi que (iii) la probabilité d'observer des mouvements de rebroussement.

5.2 Manuscrit de l'étude

Introduction

At first sight the act of stretching out the hand to catch an approaching ball appears to be quite simple. There is to date, however, still no consensus on the perceptuomotor processes underlying the performance of such an elementary action. One of the research paradigms developed in order to facilitate analysis is that of manual lateral interception, in which the hand is constrained to move along a predefined interception axis. Within this paradigm experimental control of the trajectories of the balls to be caught allows studying the kinematic patterns of the interception movements, with the end-goal of each movement (i.e., when the hand should be where) being experimentally defined. In order to avoid the uncontrolled and relatively large inherent variability in the spatiotemporal characteristics of ball trajectories resulting from the use of launching devices, Peper et al. (1994) had participants catch balls, suspended with fishing line from a high ceiling, swinging down from an initial holding position. Combining (laterally) different suspension points and initial positions, this setup allowed them to confront participants not only with balls arriving at different (experimentally controlled) locations along the interceptions axis, but also with balls arriving at the same interception location while coming from different starting positions.

This first systematic study of manual lateral interception brought out an influential result: even though participants caught the ball on all trials, the kinematics of the interception movements varied over ball trajectories converging onto the same interception location. This result clearly contradicts a predictive type of control based on perceptual estimates of when the ball will be where, as both the when and where were invariant over the ball trajectories converging onto the same interception location. To account for the pattern of results obtained, Peper et al. (1994) suggested that control was prospective, rather than predictive, and proposed a model in which hand movement is continuously regulated on the basis of information with respect to currently required hand velocity. The latter was defined as the (time evolving) ratio of the distance between the current lateral positions of the ball and hand to the time remaining until the ball arrived at the interception axis: interception is ensured when the lateral distance

between ball and hand reaches zero at the moment the ball crosses the interception axis. Peper et al.'s (1994) finding that ball trajectory affects the kinematics of interception movements has been systematically replicated in studies using pendular (Dessing et al., 2005, 2009a, 2009b, Jacobs & Michaels, 2006; Michaels et al., 2006) or rectilinear (Arzamarski et al., 2007; Ledouit et al., 2013; Montagne et al., 1999) ball trajectories, providing a firm empirical basis for the claim that lateral interception is based on prospective rather than on predictive control. However, findings differ with respect to the information used to guide the hand to the future interception location.

Analyses of the optical information specifying the ball's current lateral position (XB_0), the position on the interception axis towards which it is heading (XB_1) and the time it will take before it reaches the interception axis (TC_1) have been performed for rectilinear ball motion in the transverse plane located at the observer's eye-height (e.g., Bootsma, 1991; Bootsma & Peper, 1992; Bootsma & Oudejans, 1993; Bootsma & Craig, 2002; Michaels et al., 2006; Regan & Kaushal, 1994; Todd, 1981). These analyses have demonstrated that the above listed physical quantities are indeed specified by the states of the ball's azimuthal bearing angle θ and its optical size φ . For instance, (under the assumption of small angles) for a ball of a given size the ratio of θ to φ (i.e., θ/φ) is specific to the ball's current lateral distance and the ratio of $d\theta/dt$ to $d\varphi/dt$ (i.e., $(d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$) is specific to the lateral position at which it will pass the interception axis. Because from a bird's-eye view pendular trajectories produce linear motion in the participant's transverse plane, it was generally assumed that the above-mentioned informational variables indeed allow participants to access physical variables such as XB_0 , XB_1 and TC_1 . Michaels et al. (2006) demonstrated, however, that pendular trajectories differ from rectilinear trajectories in terms of the evolution of the states of the optic variables that might be used: for instance, rather than being invariant over time as it is for a rectilinear ball trajectory, $(d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ varies during approach of a ball following a pendular trajectory. The relation between potential optical information sources (e.g., θ/φ and $(d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$) and the physical variables they are presumed specify (e.g., XB_0 and XB_1) is thus distorted for balls following pendular trajectories, making straightforward interpretations of the results observed considerably more difficult. Because the relations remain direct (i.e. univocal) for rectilinear ball trajectories, in the present contribution we focus on the manual lateral interception of balls following rectilinear trajectories.

Inspired by Peper et al.'s (1994) findings and interpretation, Montagne et al. (1999) set out to test two predictions of the model using a manual lateral interception task with balls approaching in the transverse plane along rectilinear trajectories. The first prediction was directly derived from Peper et al. (1994): if the hand was controlled on the basis of information about the ball's future arrival position XB_1 (in this case univocally specified by $(d\theta/dt)/(d\phi/dt)$), then trajectories converging onto the same lateral position on the interception axis should give rise to identical patterns of hand movement. If, however, the hand was controlled on the basis of information about the ball's current lateral position XB_0 (now univocally specified by θ/ϕ), then rectilinear trajectories converging onto the same lateral position on the interception axis should give rise to distinct, trajectory-specific patterns of hand movement. The second prediction was also based on divergent expectations stemming from the use of information about XB_0 or XB_1 , but called upon an experimental condition hitherto not explored: balls arriving at the initial hand position should not give rise to hand movement if the hand was controlled on the basis of information about the ball's future arrival position XB_1 . However, if the hand was controlled on the basis of information about the ball's current lateral position XB_0 , then for balls approaching the intercepting axis via oblique trajectories one should expect the hand to first move away, in the direction of the current lateral ball position, before returning to the initial hand position to catch the ball.

Montagne et al. (1999) reported two major results in favor of XB_0 -based control. First, balls following different trajectories (i.e., starting from different ball departure positions) but arriving after the same duration of motion at the same location on the interception axis (i.e., identical ball arrival positions) were demonstrated to give rise to trajectory-dependent patterns of interception movement, a phenomenon referred to as the *angle-of-approach effect*. Second, while hand movement was clearly not required to intercept balls arriving at the initial hand position, in 50% of the trials movement of the hand was nevertheless observed under such conditions, with the hand first moving away from its initial position to subsequently return there to catch the ball. These *reversal movements* moreover did not appear to be random in their initial direction: balls coming from a starting position on the left tended to evoke left-right reversal movements and balls coming from a starting position to the right tended to evoke right-

left reversal movements. Neither of these results is consistent with an organization of movement based on predictive control nor on prospective XB_1 -based control.

In an attempt to replicate Montagne et al.'s (1999) results, Arzamarski et al. (2007) studied manual lateral interception of balls rolling across a solid surface (and thus following rectilinear trajectories in the transverse plane). While their findings replicated the angle-of-approach effect, they did not observe the number nor the pattern of reversal movements reported by Montagne et al. (1999). This led them to suggest that participants relied on XB_1 -based information, proposing that the angle-of-approach effect in fact resulted from a perceptual bias. Studying manual lateral interception of simulated balls following rectilinear trajectories along a screen oriented in the participants' fronto-parallel plane, Ledouit et al. (2013) demonstrated that the angle-of-approach effect generalized to this new experimental situation. In a series of follow-up experiments they subsequently demonstrated that this effect could not be explained by Arzamarski et al.'s (2007) perceptual bias hypothesis. Yet, while the angle-of-approach effect has thus systematically been observed when participants intercept balls moving along rectilinear trajectories, the number and pattern of reversal movements reported by Montagne et al. (1999) was observed neither by Arzamarski et al. (2007) nor by Ledouit et al. (2013).

How then should we consider the pattern of reversal movement reported by Montagne et al. (1999)? The fact that, contrary to the angle-of-approach effect, reversal movements were not observed in other studies and were not even systematically observed by Montagne et al. (1999) led Arzamarski et al. (2007) to question their very existence as a reproducible experimental observation. However, before concluding that the reversal movements reported by Montagne et al. (1999) simply cannot be reproduced, their experimental procedure merits to be more thoroughly scrutinized.

In the Montagne et al. (1999) study the balls to be caught were attached to a pole extending above and in front of a motorized cart that moved at constant speed along a straight track. Different angles of approach to a particular position on the participants' interception axis were obtained by rotating the whole track around a vertical axis located just below the interception axis. With balls thus always arriving at the same physical interception point, different interception conditions were obtained by positioning both the participant's hand and feet at different locations at the start of each trial. To this end, three different initial hand positions were combined with two different

foot positions. It is important to realize that throughout the experiment participants wore opaque liquid crystal spectacles that were only switched to their transparent state when the ball was approaching the interception axis; they switched back to their opaque state as soon as the ball arrived there. When participants were asked to move their hand and feet to the subsequent trial's initial conditions, they thus did so without vision of the environment: the experimenter in fact physically guided them to the position to be adopted. Due to "black light" illumination during ball approach, participants could moreover only see the white ball and the white glove on their hand. We suggest that this elaborate procedure prevented participants from knowing where the ball was going to arrive, as they did not know themselves where they were in the environment.

In both Arzamarski et al.'s (2007) and Ledouit et al.'s (2013) studies participants stood in the same place for the duration of the experiment. In the Arzamarski et al. (2007) study balls could arrive at one of three arrival positions. These three arrival positions were moreover marked on the table, as they corresponded to the three initial hand positions that participants could be asked to adopt at the start of a given trial. In the Ledouit et al. (2013) study participants always started from the same initial position while balls could arrive at five different arrival positions, including the initial hand position. Neither of these studies thus created the same kind of uncertainty with respect to where the ball could arrive as did Montagne et al.'s (1999) study.

The goal of the present study was therefore to create the conditions that might lead to the emergence of reversal movements like the ones reported by Montagne et al. (1999). Rather than replicating Montagne et al.'s (1999) elaborate procedure, we modified the virtual interception task of Ledouit et al. (2013) in the following ways. First, in order to enhance uncertainty with respect to the initial hand position, at the start of every trial the participant was required to position the hand-held stylus in a small rectangle appearing in randomly selected positions along the interception axis. When this (random) position was correctly attained, the stylus was guided to the trial's initial position by slowly moving the rectangle. Thus, while in the end the hand was always in the same position at the onset of ball motion (identical to the one used in Ledouit et al.'s, 2013, study), the positioning procedure was expected to induce at least some degree of uncertainty. Second, we used seven rather than five different arrival positions: while in the Ledouit et al. (2013) study balls arrived at the initial hand position in 1/5th or 20% of the trials, this probability was now reduced to 1/7th or 14%

of the trials. Moreover, the closest arrival positions on either side of the initial hand position were now also located closer to the initial hand position than in the Ledouit et al. (2013) study. Finally, we used a range of ball speeds chosen so that interception became quite difficult at the highest ball speed. As ball speed randomly varied over trials, this speed manipulation was expected to evoke early onsets of interceptive movements.

As detailed in the Results section, the experimental procedure adopted indeed allowed us to replicate both major findings of Montagne et al. (1999). We observed (i) angle-of-approach effects in the kinematics of interception movements directed towards each of the six ball arrival positions located on either side of the initial hand position and (ii) a considerable number of reversals movements for balls arriving at the initial hand position. We therefore followed up on these empirical results with the proposition of a model that captures both these phenomena.

Method

Participants. Eleven right-handed participants, 5 men and 6 women (22.6 ± 3.2 yrs old), voluntarily took part in the experiment. The study was approved by the local institutional review board of the *Institute of Movement Sciences* and conducted according to University regulations and the Declaration of Helsinki.

Task and Procedure. The experiment took place in a darkened room without windows. The participant sat in a chair in front of an interactive Cintiq 21UX Wacom® tablet (screen size 43.2 x 32.4 cm, 1600 x 1200 pixel resolution) positioned at a height of 0.90 m and oriented at a 60° angle, providing a plane of motion perpendicular to the participant's line of sight. The task was to intercept simulated balls moving downward (top-to-bottom) across the tablet's screen by laterally displacing the tablet's stylus along the bottom of the screen. The stylus was rigidly attached to a hand-held knob that could slide over a horizontal 50-cm long rail fixed to the table in front of the participant (see *Figure 5.1*).

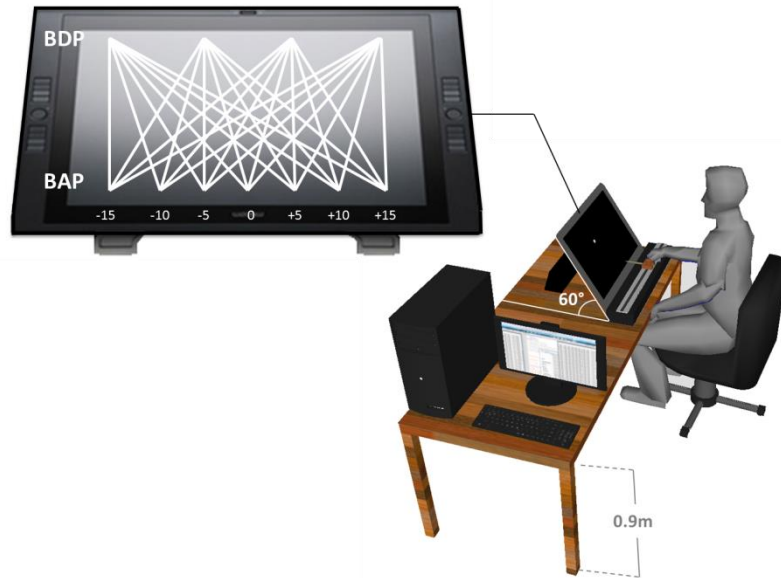


Figure 5.1: Representation of the experimental set-up. Participants moved the stylus along the (horizontal) interception axis to intercept virtual balls moving from one of four Ball Departure Positions (BDP) to one of seven Ball Arrival Positions (BAP).

A trial began with the appearance of a 1.5-cm wide by 0.8-cm high red rectangle at a random position, between -10 and $+10$ cm from the centre, on the interception axis near the bottom of the screen. When the participant positioned the stylus within this rectangle it became green and slowly (velocity 5 cm/s) moved to the trial's starting position. Participants were required to maintain the stylus within the rectangle until it came to a stop and stay at this position after the rectangle disappeared, until 1 s later a ball appeared at the top of the screen. Even though the starting position was in fact always the same (at the centre of the screen), this procedure of leading the participant on every single trial over a variable distance to a designated starting position was intended to suggest that starting position could vary. The X-Y origin of the screen was defined with respect to the starting position, X increasing negatively to the left and positively to the right of the starting position and Y increasing positively to the top of the screen. The interception trial started when a ball, represented by a 1.6-cm diameter white circle against a black background, appeared at one of the four possible departure positions ($Y = +32$ cm; $X = -15, -5, +5, \text{ or } +15$ cm) and moved at constant velocity across the screen toward one of seven possible arrival positions along the interception axis ($Y = 0$ cm; $X = -15, -10, -5, 0, +5, +10, \text{ or } +15$ cm). Combining the four ball departure positions (BDP) and the seven arrival positions (BAP) gave rise to 28 different rectilinear ball

trajectories. Balls could move at vertical (Y) speeds of 16, 20, 26.67, or 40 cm/s, for motion durations of 2.0, 1.6, 1.2, or 0.8 s. Participants performed 3 blocks of 112 trials (28 trajectories * 4 ball speeds), with the order of conditions randomized over trials within each block. Feedback with respect to interception (yes/no) was automatically provided at the end of each trial, with successful interception requiring that the distance between stylus and ball was less than 0.8 cm (equivalent to the ball radius). During the experiment, ball and stylus positions were sampled at a frequency of 100 Hz and stored on disk for each individual trial.

Data analysis. The stylus position time-series were filtered using a second-order Butterworth filter with a cut-off frequency of 5 Hz. Interception performance was assessed using constant error, defined as the distance between ball and stylus position at the moment the ball crossed the interception axis. General trends in movement kinematics were captured in ensemble averages of the time series of position of stylus displacement. In order to statistically test differences in movement kinematics, we analysed the moment of movement initiation (*Tinit*), operationally defined as the moment when hand velocity exceeded 1 cm/s leading to the first distinct movement, as well the magnitude of peak velocity (*PV*). These variables were analysed using repeated-measures Analyses of Variance (ANOVA) with factors of Ball Speed (4 levels), Ball Departure Position (4 levels), and Ball Arrival Position (6 levels, BAP = 0 excluded). When appropriate, significant ($\alpha = .05$) main effects and interactions were further analysed using Newman-Keuls post-hoc tests.

For the 4 Ball Departure Position x 4 Ball Speed conditions arriving at Ball Arrival Position = 0 cm (i.e., at the initial stylus position) we determined the number, moment of initiation and amplitude of distinct movements. As for the other ball arrival positions, distinct movement was operationally defined as a stylus displacement of more than 0.8 cm (i.e., ball radius) away from the starting position.

Results

Performance. Overall, participants intercepted 83.3% of the balls. However, interception rates varied with ball speed: interception rates were 98.1%, 97.7%, 86.0% and 51.3%, for the slowest to fastest balls, respectively. This decrease in interception performance

with increasing ball speed was also observed at the level of Constant Error, for averages of 0.33, 0.39, 0.49 and 0.94 cm, respectively. The ANOVA on Constant Error revealed main effects of Ball Speed, $F(3, 30) = 52.18, p < .001$, and Ball Arrival Position, $F(6, 60) = 35.56, p < .001$, as well as significant first-order interaction effects of Ball Speed x Ball Arrival Position, $F(18, 180) = 13.49, p < .001$, and of Ball Departure Position x Ball Arrival Position, $F(18, 180) = 8.48, p < .001$. Post-hoc analysis of these effects indicated that Constant Error was essentially affected by balls travelling at highest speed (V4), or more rarely by balls moving at V3 to the furthest Ball Arrival Positions (-15 and +15 cm) while coming from opposite Ball Departure Positions.

Movement kinematics Part 1: Trajectory effects when interception requires movement.

Because balls arriving at Ball Arrival Position (BAP) = 0 cm did not require participants to move (as the ball arrival position corresponded to the initial stylus position), we will treat this particular BAP condition in a separate section. Here we focus on the six BAP conditions that did require participants to move in order to intercept the ball (BAP = -15, -10, -5, +5, +10, and +15 cm).

Ensemble averages of stylus position over time for the six BAPs requiring stylus movement are presented in *Figure 5.2*, for each of the four ball-speed conditions separately. Visual inspection of *Figure 5.2* indicated several noteworthy results. These observations were corroborated by post-hoc analyses of the overarching triple interactions observed in repeated-measures three-way ANOVAs (factors Ball Speed, Ball Departure Position and Ball Arrival position) on the pertinent variables (*Table 5.1*).

First, Ball Speed affected both the moment of movement initiation (T_{init}) and the movement's Peak Velocity (PV). On average, movement was initiated at 0.54, 0.48, 0.41, and 0.34 s after the onset of ball motion for Ball Speeds of 16, 20, 26.67, and 40 cm/s, respectively. While movement was thus initiated somewhat earlier for higher ball speeds, PV nevertheless increased with Ball Speed: on average, peak velocity was 16.54, 18.81, 22.57, and 29.63 cm/s for Ball Speeds of 16, 20, 26.67, and 40 cm/s, respectively.

Second, trajectory effects were observed at each ball speed. That is to say, we found systematic angle-of-approach effects: ball trajectories converging via different angles of approach onto the same arrival position —different BDPs for same BAP— gave rise to different stylus movement characteristics (see *Figures 5.3* and *5.4*). Trajectories crossing

the center of the screen were initiated later than trajectories remaining on the same side of the screen. This effect was stronger for ball arrival position closer to the initial stylus position. Indeed, latest initiation was systematically observed for the conditions BDP = -15 cm to BAP = +5 cm and BDP +15 cm to BAP = -5 cm.

Table 5.1: ANOVA results for the moment of movement initiation *Tinit* and peak velocity *PV*. Analyses included repeated-measures factors Ball Speed (*BS*), Ball Departure Position (*BDP*) and Ball Arrival Position (*BAP*).

<i>Source</i>	<i>DoF</i>	<i>Tinit</i>		<i>PV</i>	
		<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
<i>BS</i>	3/30	319.58	< .001	327.56	< .001
<i>BDP</i>	3/30	23.84	< .001	4.72	< .01
<i>BAP</i>	5/50	173.60	< .001	459.50	< .001
<i>BS x BDP</i>	9/90	5.40	< .001	1.56	ns
<i>BS x BAP</i>	15/150	29.00	< .001	22.57	< .001
<i>BDP x BAP</i>	15/150	79.05	< .001	88.53	< .001
<i>BS x BDP x BAP</i>	45/450	14.04	< .001	13.27	< .001

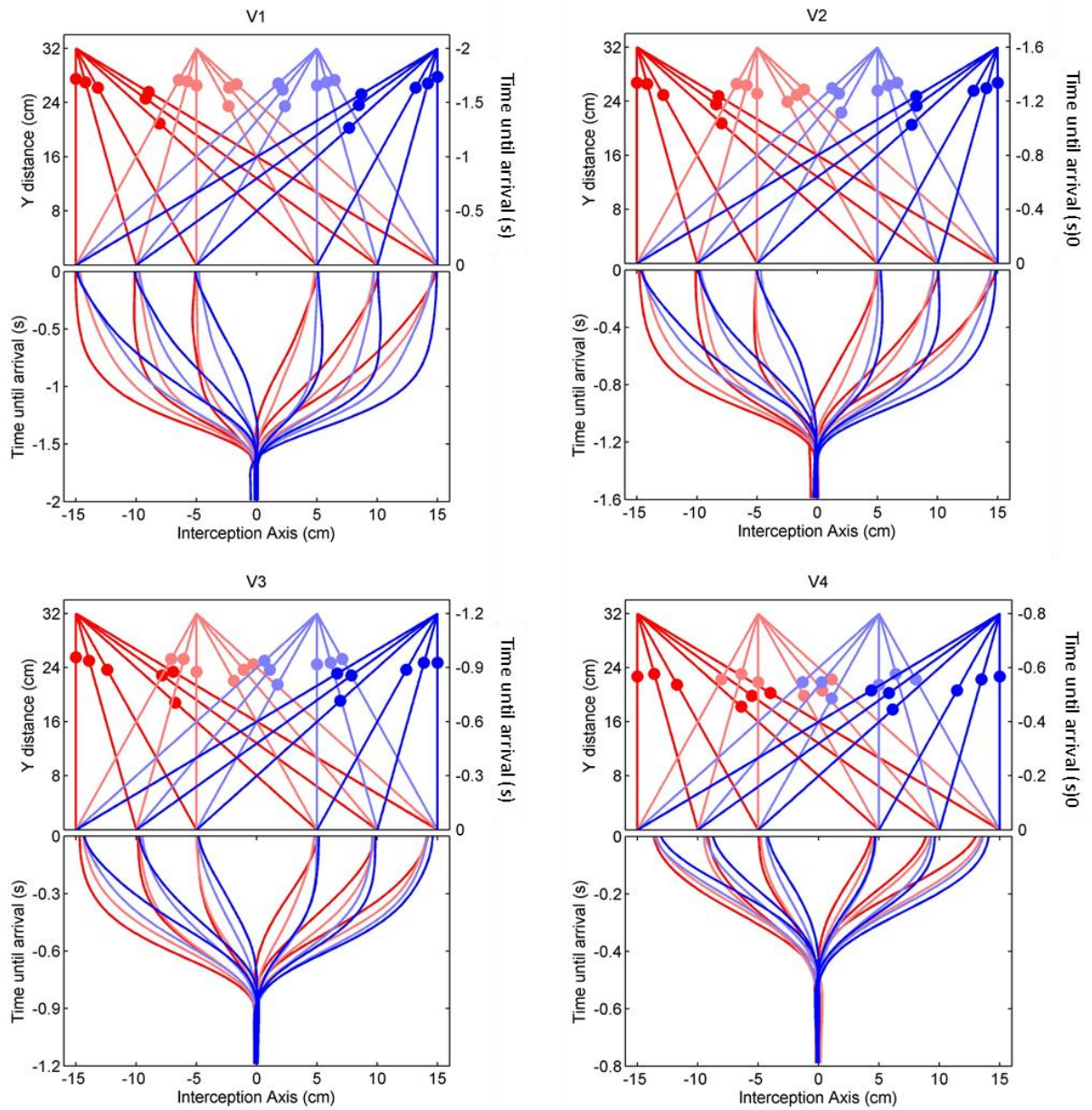


Figure 5.2: Ball trajectories and corresponding interception movements for each of the four Ball Speed conditions ($V1 = 16 \text{ cm/s}$, $V2 = 20 \text{ cm/s}$, $V3 = 26.67 \text{ cm/s}$, $V4 = 40 \text{ cm/s}$). The upper part of each panel shows the 24 rectilinear trajectories arriving at positions -15, -10, -5, +5, +10 and +15 cm), with filled circles indicating ball position at the time of initiation of the interception movement. Each color corresponds to a common ball departure position. The lower part of each panel present the ensemble averages of stylus position as a function of time until ball arrival, using the same color codes as in the upper part.

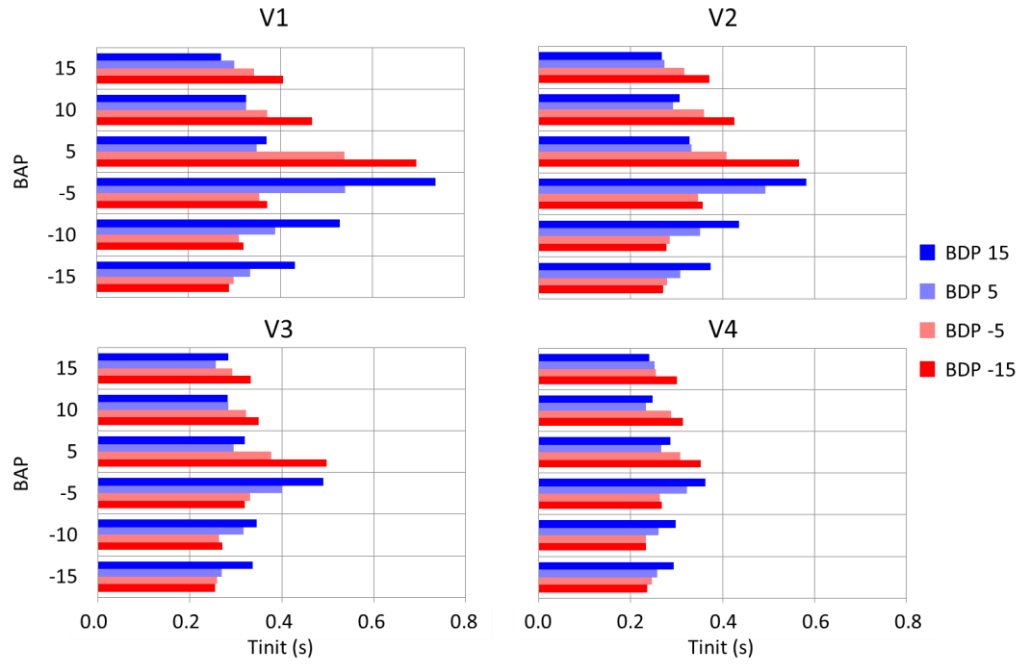


Figure 5.3: Average initiation times (T_{init}) for each combination of Ball Arrival Position (BAP) and Ball Departure Position (BDP, same color codes as in Fig. 5.2) for each of the four Ball Speed conditions ($V1 = 16 \text{ cm/s}$, $V2 = 20 \text{ cm/s}$, $V3 = 26.67 \text{ cm/s}$, $V4 = 40 \text{ cm/s}$).

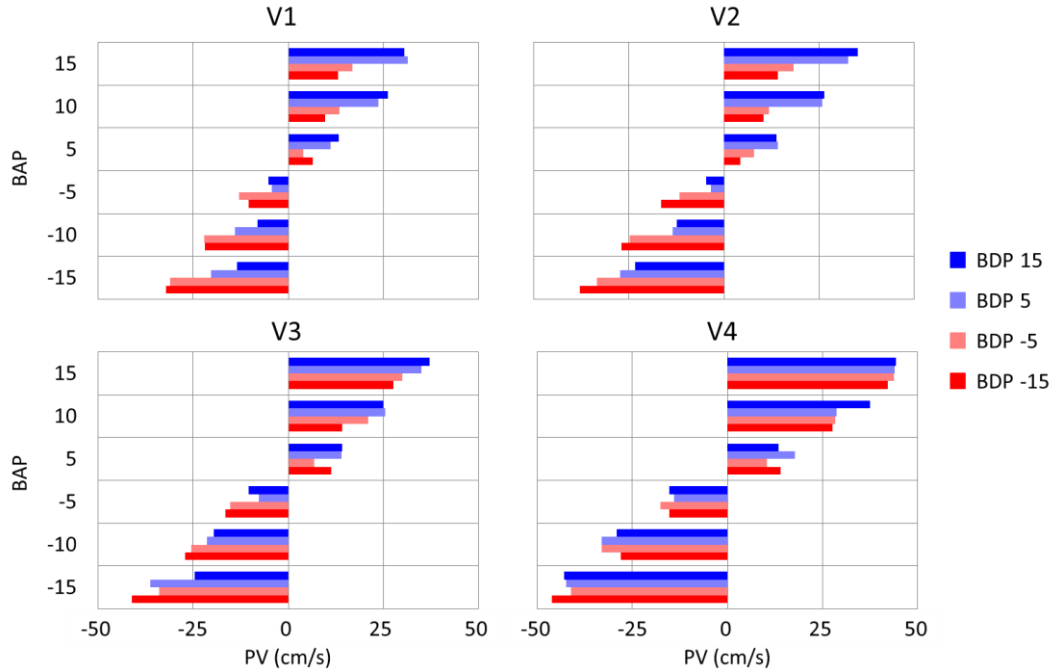


Figure 5.4: Average peak velocities (PV) for each combination of Ball Arrival Position (BAP) and Ball Departure Position (BDP, same color codes as in Fig. 5.2) for each of the four Ball Speed conditions ($V1 = 16 \text{ cm/s}$, $V2 = 20 \text{ cm/s}$, $V3 = 26.67 \text{ cm/s}$, $V4 = 40 \text{ cm/s}$).

Movement kinematics Part 2: Balls arriving at the initial stylus position (BAP = 0 cm).

In 528 of the total of 3696 trials (i.e., 1/7th or 14% of the trials), the ball followed a rectilinear trajectory that ended at the initial stylus position at the center of the screen. In these cases, no stylus movement was needed for a successful interception. Yet, distinct stylus movement was observed in 180 (i.e., 34.1%) of these trials. In the grand majority (94.4%) of cases the stylus moved away from the starting position in the direction of the Ball Departure Position. In all of the trials, stylus movement direction reversed, leading to 158 successful interceptions and 22 misses. A repeated-measures ANOVA on the number of such reversal movements, with factors of Ball Speed and Ball Departure Position (Ball Arrival Position was 0 for all these trials) showed only a significant effect of Ball Departure Position, $F(3, 30) = 5.29, p < .005$. More reversal movements were seen for balls coming at larger approach angles (*Table 5.2*): 44.7% of the trials revealed movement reversals for Ball Departure Positions ± 15 cm while 23.5% of the trials revealed movement reversals for Ball Departure Positions ± 5 cm).

Table 5.2: *Percentage of trials with BAP = 0 cm demonstrating reversal movements for each Ball Departure Position under each of the four Ball Speed (BS) conditions.*

BS	BDP				Mean
	-15 cm	-5 cm	+5 cm	+15 cm	
V1	48.5%	24.2%	21.2%	60.6%	38.6%
V2	42.4%	30.3%	24.2%	39.4%	34,1%
V3	45.5%	12.1%	24.2%	42.4%	31,6%
V4	42.4%	27.3%	24.2%	36.4%	32,6%
Mean	44.7%	23.5%	23.5%	44.7%	34.1%

Reversal movement characteristics: The amplitude of the reversal movements was affected by both Ball Speed and Ball Departure Position. A repeated-measures ANOVA showed significant main effects of Ball Speed, $F(3, 30) = 4.33, p < .05$, and Ball Departure Position, $F(3, 30) = 14.79, p < .001$, as well as a significant interaction effect of these two factors, $F(9, 90) = 5.20, p < .001$. Amplitudes were larger for balls coming more from the side (i.e., at larger approach angles). This effect was stronger the slower the balls arrived.

Movement reversals did not only show variable amplitudes but also occurred at variable moments before ball arrival. Figure 5.5 presents all 180 observed movement

reversals with their amplitude as a function of time remaining until ball arrival. Interestingly, the amplitude of the reversal movement turned out to vary with the time of movement initiation which was most clearly visible for the larger approach angles. Linear regression of reversal amplitude onto time remaining until ball arrival revealed for Ball Departure Positions -15 and +15 cm, slopes of -0.95 cm/s, $n=59$, $r = -0.62$, $p < .005$, and +1.35 cm/s, $n=59$, $r = +0.83$, $p < .001$, respectively. These results indicate that earlier initiation of a reversal movement was accompanied by larger amplitude.

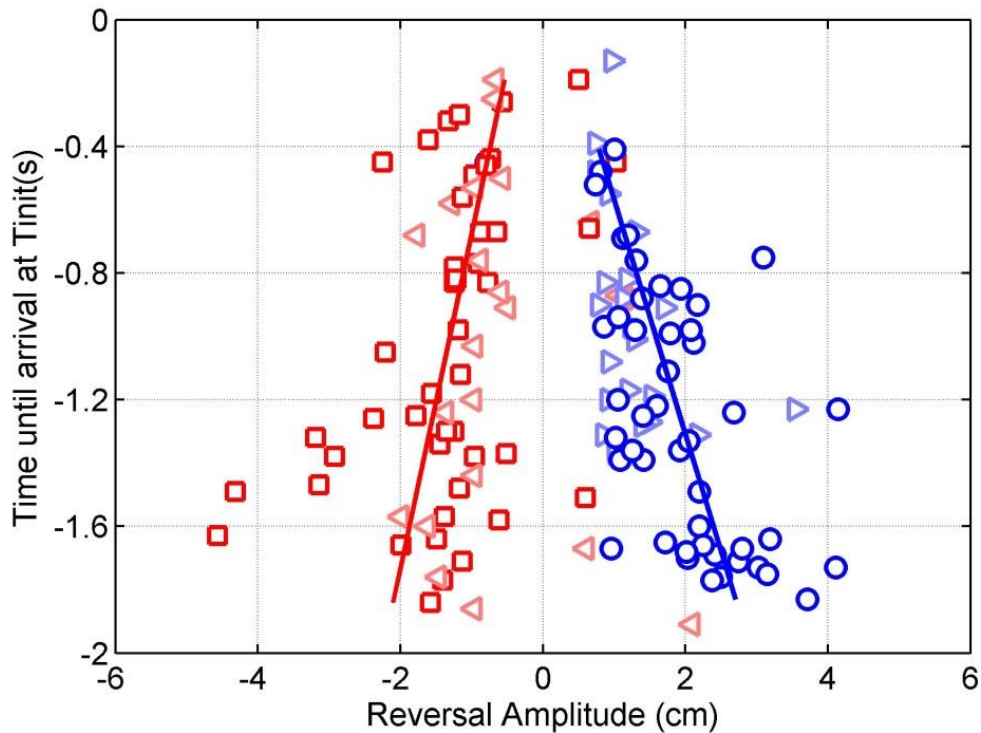


Figure 5.4: Amplitude of reversal movements as function of time until ball arrival at movement initiation for each of the 180 observed reversal movements at BAP = 0 cm. Red squares: BDP = -15 cm, red triangles: BDP = -5 cm, blue triangles: BDP = +5 cm, blue circles BDP = +15 cm. The lines represent the results of linear regressions for BDP = -15 cm (red) and BDP = +15 cm (blue).

Discussion

Studies of manual lateral interception of balls approaching the interception axis along rectilinear trajectories have systematically reported angle-of-approach effects (Arzamarski et al., 2007; Ledouit et al., 2013; Montagne et al., 1999). Thus it was not

surprising that the present study revealed this phenomenon once again: balls arriving after the same duration of motion at the same position on the interception axis gave rise to trajectory-dependent kinematic patterns in the interception movements. This clearly robust result implies that interception movements are (i) not based on predictions of when the ball will be where and (ii) are not prospectively controlled by XB_1 -based information (such as $(d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ in the case of ball motion in the transverse plane).

Contrary to the findings of Arzamarski et al. (2007) and Ledouit et al. (2013), the present study revealed that, in the particular situation that the ball will in fact arrive at the initial hand position, participants did not consistently remain where they were: in over 30% of the trials, they actually moved away from their initial position before returning there to intercept the approaching ball. In 94.4% of the cases such reversal movements were moreover specific to the characteristics of the ball trajectory: balls coming from the left of the initial hand position gave rise to left-right reversal movements, while balls coming from the right of the initial hand position gave rise to right-left reversal movements. The present study therefore confirms that, under certain conditions, reversal movements may indeed be evoked, as had been reported earlier by Montagne et al. (1999). As for the angle-of-approach effect described above, we note that the existence of the trajectory-specific reversal movements observed here and by Montagne et al. (1999) implies that interception movements are not based on predictions of when the ball will be where nor on a prospective control relying on XB_1 -based information (Arzamarski et al., 2007; Dessing & Craig, 2010; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels et al., 2006). Both sets of results thus imply that XB_0 -based information plays a role. However, there are at least two arguments to suggest that prospective control relying uniquely on XB_0 -based information cannot explain the full set of results either. The first is related to the fact that reversal movements appear to occur every now and then rather than systematically on all trials, as would be predicted by XB_0 -based control. The second is based on the finding that modeling of interception movements as being prospectively controlled by XB_0 -based information does not succeed in satisfactorily capturing the observed patterns of movement (Beek et al., 2003; Dessing et al. 2002; Jacobs & Michaels, 2006).

Following Bootsma et al. (in press) we therefore suggest that information need not be limited to position-related, that is zeroth-order (e.g., XB_0 -based such as θ/φ in

the case of ball motion in the transverse plane) or velocity-related, that is first-order (e.g., XB_1 -based such as $(d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ in the case of ball motion in the transverse plane) states. Instead we suggest that information may be of an intermediate state, that can be either conceived as resulting from a combination of informational quantities of different orders (e.g., Beek et al., 2003; Craig et al., 2009; Dessing et al., 2005) or as an informational quantity of a fractional order (Jacobs et al., 2012; Podlubny, 1999, 2002). Because the present conditions do not allow distinguishing between these two conceptions, we will for purposes of demonstration adopt a combinatorial approach. Conceptually, what we intend to suggest is that the full set of results can be understood by considering that interception movements are prospectively controlled by some (yet to be determined) form of information specifying the physical variable XB_α where $\alpha \in \mathbb{R}$.

Model

Because the highest ball speed condition gave rise to a low interception rate, modeling was restricted to the three lowest ball speeds. We recall that the main purpose for including it in the experimental procedure was to elicit early responses on the full set of experimental conditions.

Based on the logic introduced by Peper et al. (1994) and further developed by Bootsma et al. (1997) and Jacobs and Michaels (2006), we propose to consider that prospective control of hand velocity may be based on the difference between the current lateral positions of the hand and an informationally-specified lateral ball position captured by XB_α . XB_α was derived as:

$$XB_\alpha = XB_0 + \alpha \cdot (V_{ball} \cdot TC_1) \quad (5.1)$$

in which XB_0 is the current lateral position of the ball projected onto the interception axis, V_{ball} is the ball's lateral velocity and TC_1 is the time until the ball arrives at the interception axis. In the framework of the present contribution the intermediate order α is fixed (but see Bootsma et al., in press, for trajectory-dependent values of α). Optimization of model fits to the data indicated that $\alpha = 0.8$ was suitable for such

purposes. *Figure 5.5* presents an example of the evolution over time of XB_0 , XB_1 , and $XB_\alpha = XB_{0.8}$.

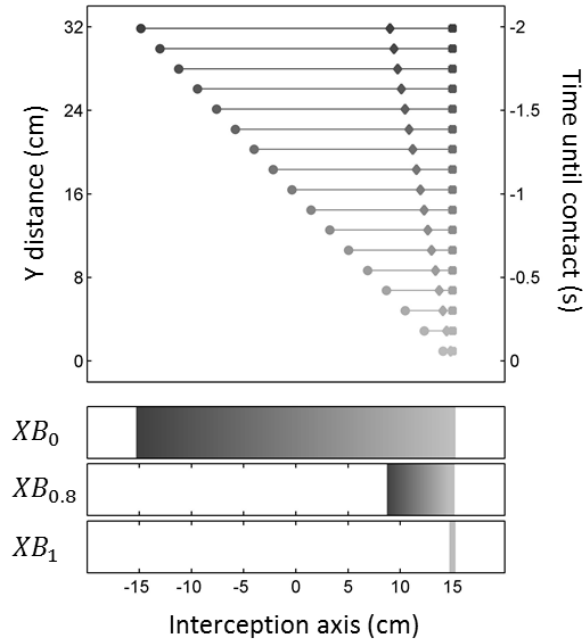


Figure 5.5: Representation of the evolution over time, for the slowest ball speed, of XB_0 , XB_1 , and $XB_{0.8}$, for a ball trajectory starting from $BDP = -15$ cm and arriving at $BAP = +15$ cm. Note that XB_0 starts from -15 cm and slides to the arrival point $+15$ cm while XB_1 is continually positioned at $+15$ cm. $XB_{0.8}$ slides from an initial position at $+9$ cm to the interception point at $+15$ cm.

Plotting, for all 24 conditions arriving at BAPs ± 15 , ± 10 and ± 5 cm, the evolution over time of $XB_{0.8}$ together with the mean T_{init} observed over all participants (see *Figure 5.6* for such a plot for the lowest ball speed) revealed that, for each ball speed, the family of 24 values of T_{init} could be captured by a single asymptotic function. The asymptote fitted to the data included two parameters: t_m , a dead period during which participants never initiated (fixed at 0.22 s) and K , a variable determining the asymptote's form:

$$A(t) = K/(t - t_m) \quad (5.2)$$

With K set to 1.1, 0.9, and 0.7, for the three different ball speed conditions (from lowest to highest, respectively), the asymptote captured the pattern of movement initiation times (R^2 values of the fit corresponding to .84, .80, and .81, respectively). For

all ball trajectories of a given ball speed condition, the asymptote thus captured the $XB_{0.8}$ space-time relation describing when movement was initiated. This result allowed us to use the asymptotes in model simulations to determine the moment of movement initiation: movement was initiated when (information about) $XB_{0.8}$ exceeded the threshold $A(t)$.

The $A(t)$ threshold indicating to the agent that movement is now required provides a framework for understanding why the trajectories arriving close to the initial hand position while coming from an initial position on the opposite side were initiated late compared to other trajectories: for these trajectories $XB_{0.8}$ was close to zero for an extended period of time. (see *Figure 5.6*).

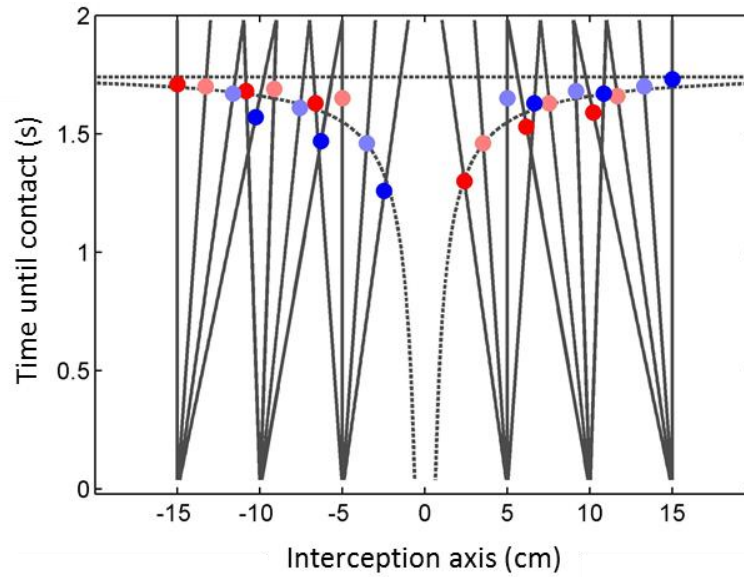


Figure 5.6. Evolution over time $XB_{0.8}$ (grey lines) for each of the 24 ball trajectories of the lowest ball speed, with the mean moments of movement initiation indicated by colored dots (color codes corresponding to that of *Figure 5.2*). The dead period before initiation (t_m) and the asymptote $A(t)$ are represented by the dotted lines.

In order to model the observed movements, we started from the attractor dynamics:

$$d^2X/dt^2 = G \cdot t_c^\alpha \cdot \left(\frac{XB_\alpha - X_h}{TC_1^\alpha} \right) - \beta \cdot V_h \quad (5.3)$$

in which, d^2X/dt^2 , V_h and X_h are, respectively, the hand's acceleration, velocity and position along the interception axis. TC_1 is the time remaining until the ball crosses the interception axis. G is a gain coefficient, t_c is a characteristic time constant, and β is a damping coefficient. Because for the present purposed α was fixed at a value of 0.8, t_c^α is in fact a constant here (but see Bootsma et al., in press, for a variable α), which may therefore be integrated into the gain coefficient G . It is included in the presentation here in order to allow the attractor dynamics' dimensional homogeneity to be apparent.

Fitting the model to observed ensemble averages of stylus position (*Figure 5.2*) was performed by optimizing parameters G (41.6) and β (8.5) of *Eq. 5.3* using sequential quadratic programming (MATLAB routine `fmincon`). Simulations of the model, including movement initiation based on the $A(t)$ threshold, are presented in *Figure 5.7* for each of the three ball speeds considered. Comparisons between *Figures 5.2* (observed movements) and *Figures 5.7* (simulated movements) reveals that the model adequately captured the qualitative aspects of the data, including the angle-of-approach effect.

In order to explain why balls arriving at the initial stylus position sometimes did and sometimes did not give rise to reversal movements, we need to take one further step. In the foregoing we have only considered average behavior, that is average initiation times and average movement patterns. However, inspection of the data for individual trials revealed that variability around the average initiation times could be quite considerable for certain trajectories (see *Figure 5.8.A*). In order to capture this variability we determined for each ball trajectory the distribution of the initiation times over the 33 available trials (3 for each of the 11 participants) in terms of deciles. The first decile reflects the initiation time of the earliest 10% of the trials; the 9th decile reflects the initiation time of the earliest 90% of the trials. The initiation times associated with each decile were separately fitted with an asymptote of the form described in *Eq. 5.2*. This family of asymptotes is presented in the *Figure 5.8.B*.

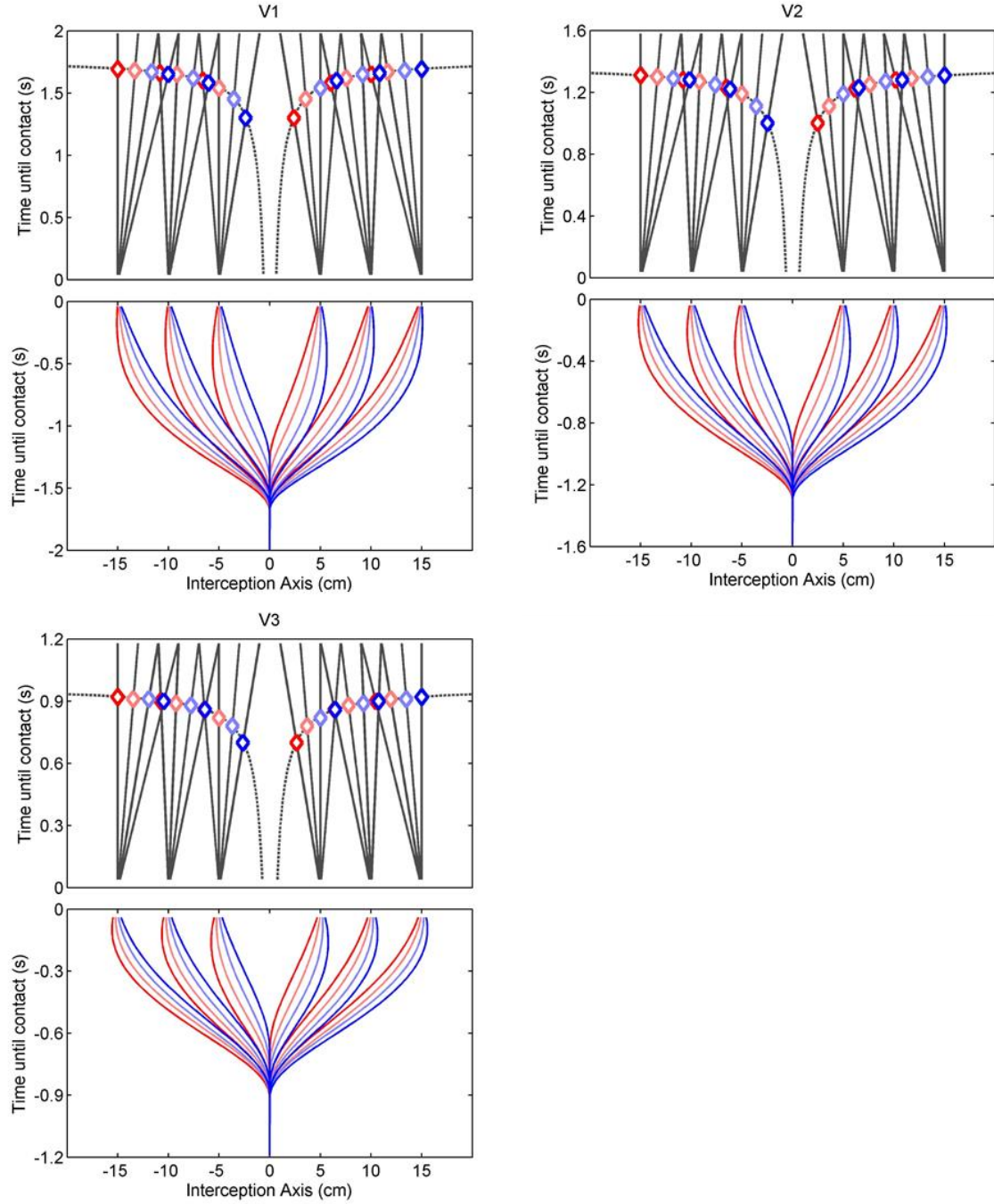


Figure 5.7: $XB_{0.8}$ of ball trajectories and corresponding simulated interception movements for the three ball speed conditions modeled ($V1 = 16$ cm/s, $V2 = 20$ cm/s, $V3 = 26.67$ cm/s). The upper part of each panel shows the evolution over time of $XB_{0.8}$ for the 24 ball trajectories arriving at positions ± 15 , ± 10 , and ± 5 cm) with colored symbols indicating the moment of movement initiation. Each color corresponds to a common ball departure position. The lower part of each panel presents the interception movements generated by the model. Color codes are the same as in Figure 5.2.

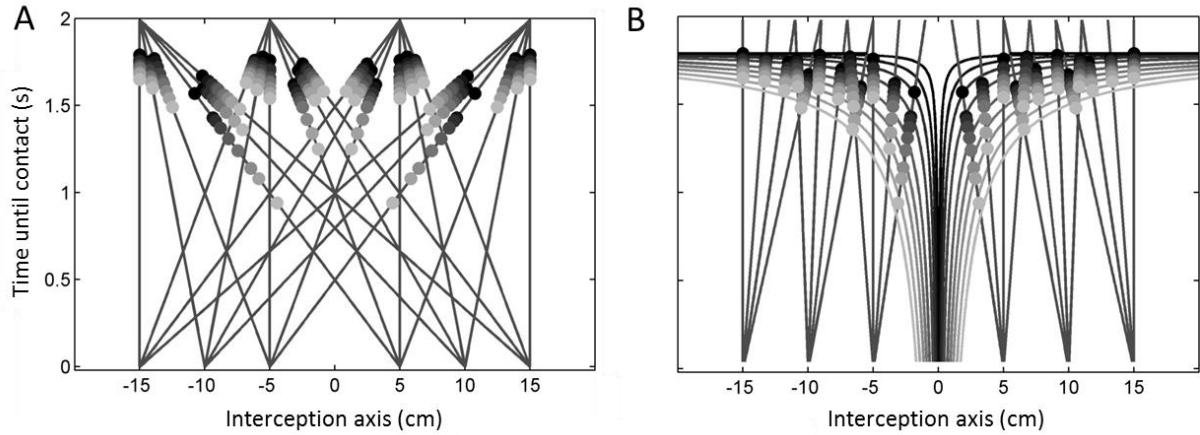


Figure 5.8: **(A)** distribution of observed initiation times, in terms of deciles, for each of the 24 ball trajectories arriving at ± 15 , ± 10 and ± 5 cm in the lowest ball speed condition. **(B)** the 9 asymptotes derived for each of the nine initiation time deciles related to $XB_{0.8}$ values.

We suggest that the trial-to-trial variability observed over initiation times under the same experimental condition may result from trial-to-trial variations in the participants' sensitivity to the threshold for movement initiation. The 9 asymptotes derived thus represented different threshold levels that could be understood as different levels of sensitivity. Note that these decile-asymptotes were derived from the data for interception movements for balls arriving at ± 15 , ± 10 and ± 5 cm from the initial stylus position. In what follows we take them to be representative of all experimental conditions, including balls arriving at BAP = 0 cm.

The evolution of $XB_{0.8}$ for the ball trajectories arriving at the initial stylus position (i.e., BAP = 0 cm) revealed that balls starting from a lateral distance of ± 15 cm crossed the asymptotes associated with first 4 deciles for movement initiation; they did not cross the asymptotes associated with the 5th and higher deciles (see upper panel of Figure 5.9). In other words, the model predicted that movement should be initiated on between 40 and 50% of the trials with BDP = ± 15 cm. For balls coming from a lateral distance of ± 5 cm, over its evolution over time $XB_{0.8}$ only crossed the 1st decile. In other words, the model predicted that movement should be initiated on between 10 and 20% of the trials with BDP = ± 5 cm (see upper panel of Figure 5.9). These predictions in fact corresponded quite closely to the observed percentage of movement reversals that reached 44.7% for trials with BDP = ± 15 cm and 22.7% for trials with BDP = ± 5 cm. Finally, the model demonstrated that if reversal movements were initiated, their

amplitude varied as a function of their moment of initiation, with movements initiated in the lowest deciles giving rise to large movement reversal amplitudes than movement initiated in the higher deciles (see lower panel of *Figure 5.9*).

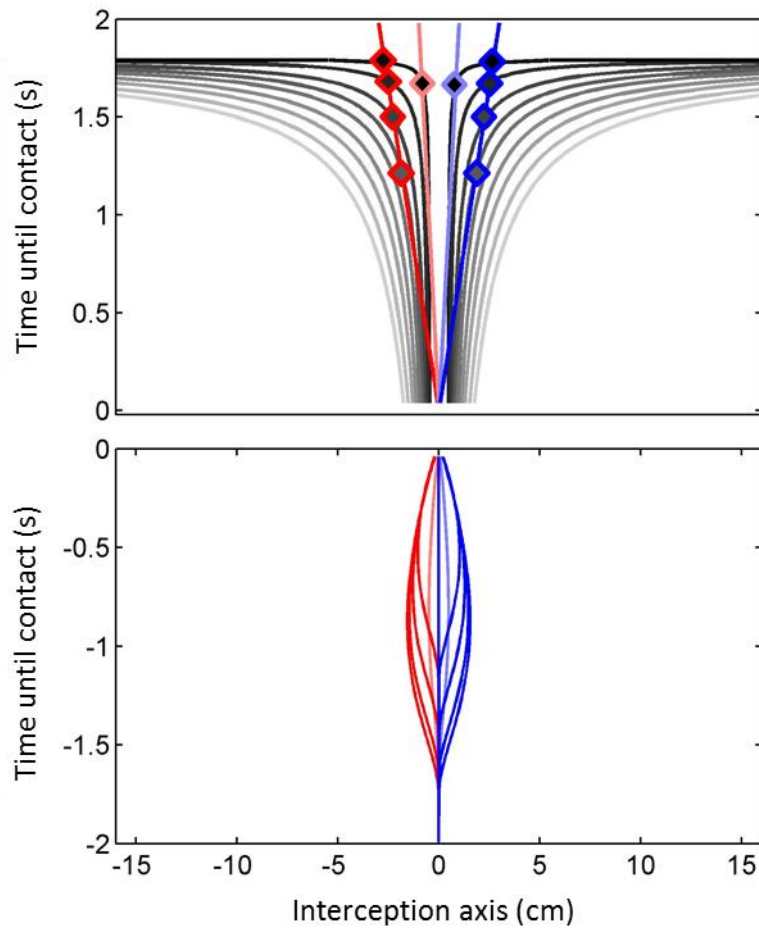


Figure 5.9: Upper panel: Evolution over time of $XB_{0.8}$ for balls arriving at the initial stylus position (i.e., $BAP = 0$ cm) and threshold asymptotes with colored symbols indicating the moment of movement initiation depending on the threshold (for the lowest ball speed condition). Lower panel: Model-generated movements for the different thresholds. Different colors correspond to different ball departure position.

General Discussion

Studying lateral manual interception for balls approaching along rectilinear trajectories in the transverse plane, Montagne et al. (1999) reported two major results.

The first, known as the *angle-of-approach effect*, was the finding that ball trajectories of equal duration, starting from different departure positions but converging onto the same location on the interception axis, gave rise to interception movement patterns that systematically varied with the ball's angle of approach to the interception axis (i.e., the trajectory incidence angle). The second was the finding that *reversal movements* were observed for a substantial proportion of the subset of trials in which the ball moved directly toward the initial hand position. Such reversal movements were generally characterized by a first movement of the hand away from its initial position in the direction of the ball's departure position, followed by a reversal of the direction of hand movement leading it to catch the ball at the hand's initial position. Both findings are not only incompatible with an interception strategy based on predictions of when the ball will be where (i.e., predictive control), but they also demonstrate that the information-based regulation of interception movements (i.e., prospective control) does not rely uniquely on first-order information specifying XB_1 , the ball's future arrival position on the interception axis if its direction of motion remains constant. Both results can be taken to indicate that information specifying XB_0 , the ball's current lateral position, also plays a role.

The angle-of-approach effect was replicated in subsequent studies of lateral manual interception using rectilinear ball trajectories, both for balls moving in the transverse plane (Arzamarski et al., 2007) and for balls moving in the fronto-parallel plane (Ledouit et al., 2013). Neither of these studies, however, replicated the number or pattern of reversal movements reported by Montagne et al. (1999). By deploying a large number of ball arrival positions separated by small distances between adjacent positions, we sought to reproduce the uncertainty with respect to where the ball might arrive associated with Montagne et al.'s (1999) experimental procedure. This uncertainty was further enhanced by the particular procedure deployed to bring the hand to its initial position before the start of each trial.

The procedural adaptations adopted in the present study allowed us replicate both of Montagne et al.'s (1999) major results: we not only (once again) found the angle-of-approach effect but also documented the appearance of a considerable number of reversal movements. Indeed, reversal movements were observed in 34% of the subset of trials in which balls arrived at the hand's initial position. Moreover, in the grand majority of cases these reversal movements were characterized by an initial movement

in the direction of the ball's departure position. We therefore conclude that reversal movements may indeed be evoked in lateral manual interception tasks. Reinforcing the conclusions drawn from the existence of the angle-of-approach effect (Ledouit et al., 2013), the occurrence of reversal movements indicates that movement is not prospectively controlled uniquely on the basis of information with respect to XB_1 ; XB_0 -based information also appears to play a role.

In order to advance beyond this general conclusion in our understanding of the control of lateral manual interception, we proposed a model of prospective control with attractor dynamics based on information of an intermediate order, that is, an order between 0 and 1 (also see Bootsma et al., in press). For the purposes of the present contribution, we explored the potential of an intermediate order of 0.8. Modeling the prospective control of lateral manual interception as an attractor dynamics based on information with respect to $XB_{0.8}$ allowed us to capture many of the qualitative aspects of the full set of results obtained.

First of all, these attractor dynamics based on information with respect to $XB_{0.8}$ allowed us to understand the pattern observed in the movement initiation times, systematically varying over different ball trajectories. Earlier work generally attempted to understand movement initiation as resulting from a perceptual variable reaching a critical value, but failed to provide a general principle (see Wann, 1996, for a critical review of one such variable; also see Michaels, Zeinstra, & Oudejans, 2001, for an alternative). The large set of ball trajectories explored here revealed that movement initiation could be understood as resulting from the (time-evolving because ball-motion dependent) $XB_{0.8}$ -value exceeding a threshold that itself decreased over time following an asymptotic-shaped function. In other words, movement was initiated early when the associated current value of $XB_{0.8}$ was large, indicating that the hand needed to cover a considerable distance in order to intercept the ball; if, on the other hand, the value of $XB_{0.8}$ remained smaller, indicating that the hand needed to cover less distance, the threshold was reached later.

Second, simulating interception movements (initiated according to the above-described logic) using the attractor dynamics based on information with respect to $XB_{0.8}$ generated the experimentally-observed angle-of-approach effect.

Third, due to the reliance on information with respect to $XB_{0.8}$, the model was also capable of producing reversal movements. In order to capture the finding that such

reversal movements did not occur on all trials, we used the experimentally-observed variability in the movement initiation times for each ball trajectory to define a family of thresholds (corresponding to the decile distribution of observed movement initiation times). Each threshold was conceived as representing a particular degree of sensitivity to the information on the part of the intercepting participants, thus instantiating the assumption that participants' sensitivity varied over repeated trials. The variations over trials in the participants' sensitivity to the information allowed us to understand why reversal movements were observed on some trials but not on others: a lower threshold (higher sensitivity) gave rise to reversal movements, while a higher threshold (lower sensitivity) did not. Furthermore, these variations in the participants' sensitivity to the information allowed us to understand why certain ball trajectories evoked a larger proportion of reversal movements (45% for the balls coming from the outer departure positions and thereby associated with larger $XB_{0.8}$ -values) and other trajectories evoked a smaller proportion of reversal movements (23% for the balls coming from the inner departure positions and thereby associated with smaller $XB_{0.8}$ -values). Finally, the model allowed us to understand why the amplitude of reversal movements varied with the moment of movement initiation: earlier initiation was associated with a larger $XB_{0.8}$ -value, drawing the hand further away from its initial position before reversing movement direction.

From a conceptual point of view, prospective control based on information of an intermediate order thus appears quite attractive, as it may capture many (if not all) of the qualitative aspects of the interception movements observed here and in the literature on manual lateral interception of rectilinear ball trajectories (Arzamarski et al., 2007; Ledouit et al., 2013; Montagne et al., 1999). Mathematical operationalization of such intermediate orders by way of fractional time derivatives of a single optical variable allowed Bootsma et al. (in press) to accurately model locomotor lateral interception movements. For several reasons, we are not (yet) able to do so for the case of manual lateral interception. First of all, in the present contribution we have used the physical variable $XB_{0.8}$ in our model rather than the required specifying optical variable. Second, we have simply assumed that the system was continuously operating with an intermediate order of 0.8. Providing a self-tuning mechanism by which the appropriate order is selected (see Bootsma et al., in press), would clearly offer a stronger conceptual basis, while at the same time allowing for variations in order over different experimental

conditions. Whether it are these or other reasons that give rise to quantitative imperfections and the need to adapt the K -parameter of the asymptotic threshold function for the different ball speeds considered therefore remains an open question. We thus cannot but conclude that, while we believe to have demonstrated the rich potential of reliance on information of intermediate order for the understanding of manual lateral interception, much work remains to be done before a full-fledged model can be proposed.

6. Une information d'ordre fractionnaire dans le contrôle visuel de l'interception locomotrice latérale

6.1. Positionnement de l'étude

Cette troisième étude expérimentale nous a permis de concrétiser le concept de variable d'ordre intermédiaire pour le contrôle du mouvement d'interception. Les participants de cette étude devaient intercepter par des déplacements latéraux locomoteurs (et non plus manuels) des mobiles empruntant des trajectoires rectilignes et curvilignes. Nous avons observé encore une fois un effet systématique d'angle d'approche des trajectoires rectilignes sur le comportement cinématique. Aussi, nous avons observé de nombreux mouvements de rebroussements pour 12 des 16 conditions pour lesquelles les trajectoires étaient curvilignes. Le développement d'un modèle dynamique basé sur l'annulation d'une variable optique d'ordre fractionnaire (intermédiaire) a validé les hypothèses émises dans la deuxième étude. En effet, une variable optique d'ordre fractionnaire comprise entre 0 et 1 pour intercepter un mobile avec une trajectoire rectiligne permettait de simuler l'effet d'angle d'approche. De plus, cette étude a apporté des éléments de preuve pour montrer que le système visuel humain pourrait être sensible à des variables informationnelles d'ordre supérieur à 1. Une simulation satisfaisante des comportements cinématiques pour l'interception de trajectoires curvilignes nécessitait l'incorporation de variable optique d'ordre compris entre 1 et 2. Le modèle développé a permis de simuler les comportements cinématiques observés (temps d'initiation selon la condition expérimentale, effet d'angle d'approche pour les trajectoires rectilignes, timing et amplitude des mouvements de rebroussement).

6.2 Manuscrit de l'étude

Introduction

Interceptive actions are paradigmatic examples of our behavioral interaction with dynamic elements of the environment. In the present contribution we address the functional organization of locomotor interception, operationally defined as making contact with a moving target by means of whole-body displacement. More specifically, we address the issue of the visual information used to organize such interceptive locomotor actions. While our study examines the example of soccer goalkeepers moving laterally to intercept balls shot at goal from long range, locomotor interception is of course encountered in many different situations and animal species, notably in the form of chasing prey, mates or invaders.

Studying freely moving agents chasing natural or artificial targets, a large body of locomotor interception work has focused on the correspondence of the behavioral patterns to one of two interception heuristics that we will refer to as classical pursuit and classical interception, respectively. In the case of unconstrained movement (see *Figure 6.1.A*), classical pursuit is characterized by moving, at every instant, in the current direction of the target. In the terms of Fajen and Warren (2007), classical pursuit thus entails steering (i.e., changing heading) to align the locomotor velocity vector with the target's bearing direction such that the target-heading angle β (= heading angle ϕ - bearing angle θ) is equal to zero. For classical pursuit to allow the agent to make contact with the target, agent velocity needs to be larger than target velocity (i.e., $v_a > v_t$). Classical pursuit has been documented in houseflies (Land & Collett, 1974), blowflies (Boeddeker, Kern, & Egelhaaf, 2003), honeybees (Gries & Koeniger, 1996) and tiger beetles (Gilbert, 1997; Haselsteiner, Gilbert, & Wang, 2014). The alternative, classical interception, is characterized by moving in a direction ahead of the target "on a course that will keep the angular deviation of the target from the line of travel constant" (Lanchester & Mark, 1975, p. 628), that is, by maintaining target-heading angle[§] β at a

[§] Many studies have erroneously referred to the angle subtended at the point of observation by the target's angular position with respect to the agent's direction of locomotion as the target's bearing angle rather than the target-heading angle. However, by definition (Fajen & Warren, 2003; 2007; Klatzky, 1998), bearing is defined with respect to an exocentric (allocentric) frame of reference.

constant non-zero value. For classical interception to allow the agent to make contact with the target, the agent's transverse velocity needs to match the target's transverse velocity (i.e., $v_{t,a} = v_{t,t}$) while ensuring that the distance between target and agent decreases (i.e., $v_{r,a} > v_{r,t}$)^h. Such classical interception has been documented in teleost fish (Lanchester & Mark, 1975), dragonflies (Olberg, Worthington, & Venator, 2000), bats (Ghose, Horiuchi, Krishnaprasad, & Moss, 2006), falcons (Kane & Zamani, 2014), hawks (Kane & Zamani, 2014), dogs (Shaffer, Krauchunas, Eddy, & McBeath, 2004) and humans (Fajen & Warren, 2004).

It has often been assumed that finding that over the course of interception the target-heading angle β remains close to zero or close to a particular non-zero value provides evidence for the operation of a control strategy based on, respectively, classical pursuit or classical interception heuristics. It is important to realize, however, that such evidence is but circumstantial. Direct evidence requires specification of how such a result is brought about, that is, specification of how the agent dynamically controls the locomotor velocity vector. If control is based on the state of target-heading angle β , as suggested by the classical pursuit and interception heuristics, then the steering dynamic driving target-heading angle β to zero (thereby instantiating a classical pursuit strategy) is provided by nulling β , and the steering dynamic driving target-heading angle β to a constant value (thereby instantiating a classical interception strategy) by nulling the rate of change of β .

^h Following Fajen and Warren (2007), we assume that v_r is positive in the direction extending from the agent to the target, such that $v_{r,a} > 0$ and $v_{r,t} < 0$ in *Figure 6.1.A*.

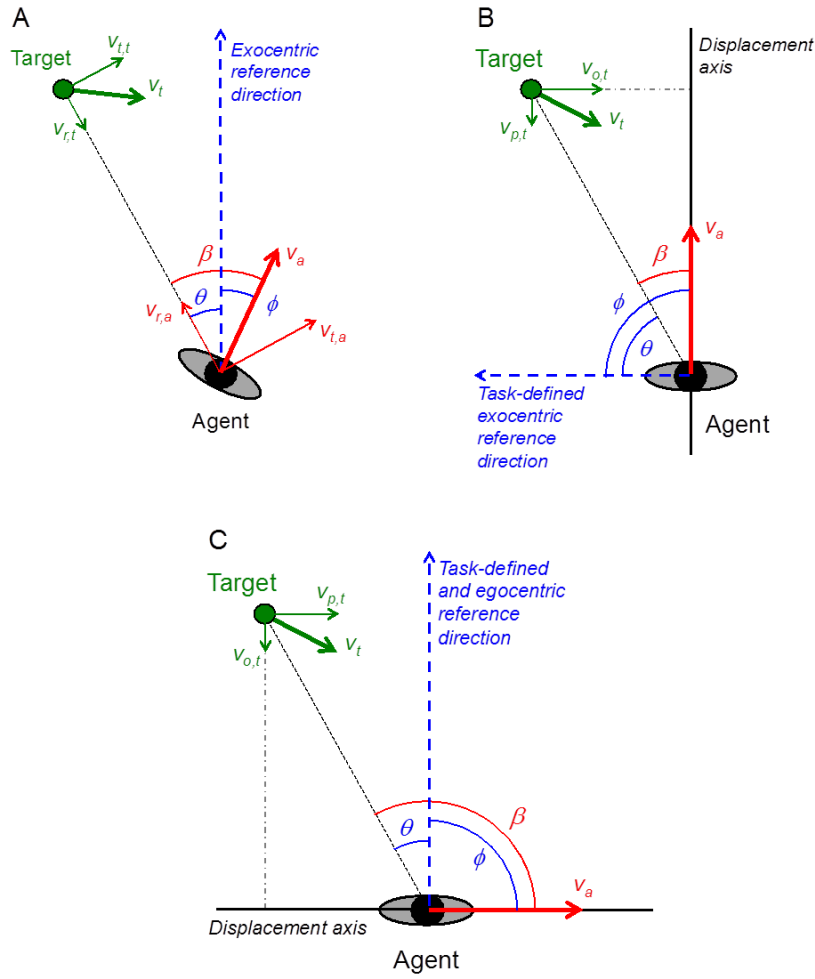


Figure 6.1: Plan view of an agent moving through an environment containing a target moving in the transverse plane. (A) Definition of variables for a freely moving agent. Agent heading ϕ and target bearing θ are defined with respect to an exocentric reference direction (dashed-blue line). Target-heading angle β is defined by the eccentricity of the target with respect to the agent's direction of locomotion. The radial components of agent and target speeds (i.e., $v_{r,a}$ and $v_{r,t}$) determine the evolution of agent-target distance. **(B)** Situation for a direction-constrained agent moving forward along a fixed displacement axis. For interception to be possible, the target must have an orthogonal speed component $v_{o,t}$ reducing its distance to the interception axis. The task thus defines an exocentric reference direction perpendicular to the agent's displacement axis. **(C)** Situation for a direction constrained agent moving laterally along a fixed displacement axis. In this situation the exocentric reference direction defined by the task, again perpendicular to the agent's displacement axis, coincides with the agent's egocentric reference direction. In each of the three situations $\beta = \phi - \theta$.

Simulations using such dynamic steering models led Fajen and Warren (2007) to conclude that a $d\beta/dt$ -based classical interception strategy was in fact underconstrained: it resulted in the agent leading the target under some conditions but lagging it under other conditions. The lag solution was not consistent with their empirical observations. Fajen and Warren (2007) subsequently demonstrated that, consistent with their empirical observations, a steering dynamic based on nulling the rate of change in bearing angle θ reliably led the agent to steer onto a straight interception path leading the target. Of course, on a straight path (i.e., with a fixed heading angle ϕ) a constant value of bearing angle θ is accompanied by a constant value of target-heading angle β . Yet, Fajen and Warren's (2007) modeling work revealed that control (i.e., in their case how to get to the straight path and remain there) relies on nulling $d\theta/dt$ and not on nulling $d\beta/dt$ (also see Olberg et al., 2000).

Whereas animal work has typically studied freely moving agents, human locomotor interception of targets moving in the transverse plane has often been studied in direction-constrained paradigms, with participants riding a tricycle along a ground-fixed rail (Lenoir et al., 1999; Lenoir, Musch, Thiery, & Savelsbergh, 2002), walking along a designated line (Chohan, Savelsbergh, van Kampen, Wind, & Verheul, 2006; Chohan, Verheul, Van Kampen, Wind, & Savelsbergh, 2008) or walking on a treadmill (Bastin, Craig, & Montagne, 2006; Bastin, Jacobs, Morice, Craig, & Montagne, 2008; Chardenon, Montagne, Buekers, & Laurent, 2002; Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2004; 2005; Morice, François, Jacobs, & Montagne, 2010). Compared to the situation where agents can move freely (*Figure 6.1.A*), constraining locomotor displacement to a fixed direction (*Figure 6.1.B*) has a number of consequences. First, as steering is no longer possible, the agent can only control locomotor speed v_a . Second, the agent can no longer influence the location where contact with the target may be established; this location is now exclusively determined by the characteristics of the target's trajectory. Finally, for interception to be possible at all in a direction-constrained setting the target's trajectory must cross the agent's displacement axis. In other words, it must have an orthogonal velocity component $v_{o,t}$ reducing its distance to the agent's displacement axis. A direction-constrained setting thereby sets up a task-defined exocentric reference direction for locomotor interception that is orthogonal to the locomotor axis. (*Figure 6.1.B*).

In the light of the foregoing, it is perhaps surprising that studies of direction-constrained locomotor interception have systematically focused on the target-heading angle β rather than on the bearing angle θ . Moreover, all concluded that locomotor interception was (at least to a certain extent) controlled by nulling $d\beta/dt$ (Bastin et al., 2006; 2008; Chardenon et al., 2002; 2004; 2005; Chohan et al., 2006; 2008; Lenoir et al., 1999; 2002; Morice et al., 2010)ⁱ. Not only does our analysis of the literature suggest that for a first-order interception strategy agents would rely on nulling $d\theta/dt$ rather than $d\beta/dt$, but focusing on β also eradicates the potential use of a pursuit-like strategy. Indeed, in a direction-constrained paradigm nulling β is not a viable interception strategy: Unrelated to the agent's position (and thus to the establishment of contact), target bearing angle β reaches zero when the target crosses the agent's axis of displacement. Nulling θ , on the other hand, does allow instantiating a viable pursuit strategy, because it leads the agent to continuously track the target and thereby intercept it when the target crosses the agent's displacement axis. Finally, while for a stationary agent target-heading angle β is undefined, this is not the case for bearing angle θ . In order to make the link with the literature on (direction-constrained) lateral manual interception studies (Arzamarski, Harrison, Hajnal, & Michaels, 2007; Dessing & Craig, 2010; Dessing, Beek, Caljouw, & Peper, 2004; Dessing, Bullock, Peper, & Beek, 2002; Dessing, Oostwoud Wijdenes, Peper, & Beek, 2009; Dessing, Peper, Bullock, & Beek, 2005; Jacobs & Michaels, 2006; Ledouit, Casanova, Zaal, & Bootsma, 2013; Michaels, Jacobs, & Bongers, 2006; Montagne, Fraisse, Ripoll, & Laurent, 2000; Montagne, Laurent, Durey, & Bootsma, 1999; Peper, Bootsma, Mestre, & Bakker, 1994), the present study focused on lateral locomotor interception. As can be seen from *Figure 6.1.C*, the target's bearing angle θ coincides with its egocentric orientation in this particular situation. Using a large-scale virtual reality set-up participants were immersed in the setting of a soccer goalkeeper that could move laterally along the goal line (displacement axis) so as to intercept balls shot at goal from long range. In order to elucidate the information-based control strategy used in such lateral locomotor

ⁱ When moving over an earth-fixed ground surface target-heading angle β and bearing angle θ are of course complementary and nulling the one is therefore equivalent to nulling the other. Chardenon *et al.* (2004) however demonstrated that lateral translation of the visual ground surface during locomotor interception gave rise to adaptations in locomotor velocity that were consistent with the visually-induced change in θ but, under the assumption that heading direction was perceived from optic flow, not with the concomitant visually-induced change in β .

interception, we studied participant behavior when intercepting both straight and curving ball trajectories.

With the relevant information for lateral locomotor interception thus defined by the state of the optical angle θ , we can distinguish at least three potential control strategies based on the temporal-derivative order of θ that is being nulled: a zeroth-order control strategy based on nulling optical position θ (i.e., nulling $d^0\theta/dt^0$), a first-order control strategy based on nulling optical velocity $d\theta/dt$ (i.e., nulling $d^1\theta/dt^1$), and a second-order control strategy based on nulling optical acceleration (i.e., nulling $d^2\theta/dt^2$). Given that the latter strategy, proposed within the framework of catching fly balls^k, has been questioned on the basis of the human visual system's low sensitivity to acceleration (Brouwer, Brenner, & Smeets, 2002; Calderone & Kaiser, 1989; Werkhoven, Snippe, & Toet, 1992; Zaal, Bongers, Pepping, & Bootsma, 2012), it does not seem reasonable to consider strategies based on even higher orders.

Based on the consensus in the literature (Chardenon et al., 2002; 2004; 2005; Chohan et al., 2006; 2008; Fajen & Warren, 2007; Lenoir et al., 1999; 2002), lateral locomotor interception of balls following straight trajectories would be expected to rely on a first-order $d\theta/dt$ -nulling strategy. However, studies on lateral manual interception have demonstrated that balls following straight trajectories starting from the same distance from the interception axis and arriving at the same lateral position after the same flight duration give rise to ball-trajectory- dependent interception patterns (Arzamarski et al., 2007; Ledouit et al., 2013; Montagne et al., 1999). If also present in locomotor interception, this angle-of-approach effect (Ledouit et al., 2013) would militate against a $d\theta/dt$ -nulling strategy.

The present study tested the adequacy of the first-order $d\theta/dt$ -nulling interception strategy to capture the behavioral patterns observed not only for straight but also for curving ball trajectories. The phenomena encountered when ball trajectories curve (e.g., under the influence of sidespin) indeed provide some qualitative evidence in favor of a first-order strategy. For instance, even top-level soccer players make errors in judging whether balls following laterally curving trajectories will end up in the goalmouth

^k Rotating the reference frame of *Figure 6.1.B* by 90° around the agent's displacement axis allows examining the situation of target motion in the sagittal plane (Chapman, 1968; McLeod & Dienes, 1996; McLeod, Reed, & Dienes, 2003; Michaels & Oudejans, 1992; Todd, 1981; Zaal & Michaels, 2003). Because gravity will eventually lead inanimate targets initially moving upward to fall back onto the agent's locomotor surface, the task still defines an appropriate exocentric reference direction (the gravity-defined vertical).

(Craig, Berton, Rao, Fernandez, & Bootsma, 2006; Craig et al., 2009). Moreover, in direction-constrained paradigms, locomotor interception of curving ball trajectories has been demonstrated to give rise to ball-trajectory-specific changes in locomotor velocity (Bastin et al., 2006; 2008; Morice et al., 2010), sometimes even leading to reversal of movement direction (Casanova, Borg, & Bootsma, 2015; Lenoir, Vansteenkiste, Vermeulen, & De Clercq, 2005). Similar results have been reported for manual lateral interception (Craig, Bastin, & Montagne, 2011; Dessing & Craig, 2010). However, the generally-drawn conclusion that participants relied on a first-order strategy for the interception of balls following curved trajectories is, for the moment, predominantly supported by the capability of such an interception strategy to capture certain qualitative aspects of the behavioral patterns observed. Modeling of a first-order strategy, on the other hand, yielded rather modest levels of fit, even when parameters were allowed to vary over experimental conditions (Bastin et al., 2006; 2008; Morice et al., 2010).

Going beyond the qualitative character of earlier studies focusing on the general form of the interception patterns observed, in the present contribution we also examined the potential of informational variables of different orders (i.e., θ , $d\theta/dt$ and $d^2\theta/dt^2$) to structure the movement characteristics at key moments of the interceptive action. As these analyses demonstrated that none of the three interception strategies considered (nulling $d^0\theta/dt^0$; $d^1\theta/dt^1$ or $d^2\theta/dt^2$) could capture the behavioral patterns observed, we propose a new perspective for the control of interceptive actions based on nulling information of a fractional rather than integer temporal-derivative order (Beek, Peper, Daffertshofer, van Soest, & Meijer, 1998; Jacobs, Vaz, & Michaels, 2012; Podlubny, 1999; 2002).

Method

Participants. Twenty-one experienced male soccer players (age 25.8 ± 7.7 years) voluntarily participated. All participants had at least four years of experience in competitive weekly matches.

Task and Procedure. Using a model incorporating aerodynamic Magnus-Robins lift and drag forces fully described earlier (Craig et al., 2006), we calculated a set of trajectories

departing 30 m from the goal line at lateral distances of -4 m and +4 m with respect to the center of the goal and arriving in the goal at lateral distances of -1.8, -0.6, +0.6, and +1.8 m, at a height of around 1.2 m. For each combination of departure and arrival positions one straight (No Spin, NS) and two curving (10 rot·s⁻¹ around the ball's vertical axis Clockwise Spin, CS, and Counter-Clockwise spin, CCS) trajectories were derived, for a total of 24 trajectories (see *Figure 6.2.A*). To allow sufficient player displacement, we slowed down the ball trajectories to flight durations of 2.66 ± 0.07 s, doubling the original ball flight durations using linear interpolation between successive positions. A block of trials included all 24 trajectories presented in random order. Each participant performed five blocks of trials.

The experiment took place in a large virtual-reality facility (crvm.ism.univ-amu.fr) comprising four projection surfaces, each served by two projectors: a 3 x 3 m floor and three 4-m high x 3-m wide walls. The sidewalls were opened at 45° angles with respect to the front wall (theatre configuration) allowing participants to move laterally over a distance of 7.2 m. Stereopsis was ensured with passive Infitec® filter technology. Participants' stereo glasses were equipped with a configuration of reflective markers. An eight-camera ART® optical system enabled real-time motion capture of head position. The visual scene was refreshed at 60 Hz, taking into account the position of the participant's eyes relative to the virtual environment.

Using in-house developed software (ICE) we simulated a soccer stadium with a grass pitch. Positioned within a regulation-sized goal (7.32 m wide and 2.44 m high), participants could see the pitch with the goal line and other regulation white chalk lines. At the start of each trial an arrow on the front screen guided the participant to the initial position on the goal line, halfway between the goalposts. After the participant had remained at the initial position for 1 s, the 0.22-m diameter plain white ball (Casanova *et al.*, 2015) started its flight trajectory. Participants were instructed to move along the goal line to try to intercept the ball with the torso (mid-line of the body), with the two arms jointly cupping the ball. While this did not prevent participants from using their hands every now and then when they realized that they were somewhat too late, a series of 20 randomly selected practice trials allowed them to correctly understand the whole-body movement task.

Data Analysis. The position of the participant's head (obtained by tracking the markers placed on the participant's stereo glasses and sampled at 100 Hz) was filtered using a dual-pass second-order Butterworth filter with a cut-off frequency of 3 Hz. Movement initiation was determined by identifying the first 0.11-m (ball radius) change in position and then scanning backwards in time for the moment participant velocity exceeded a threshold of 0.05 m·s⁻¹. All data series were aligned with the moment of arrival of the ball in the goal. For each ball trajectory, ensemble averages of participant movement were obtained by averaging for each point in time all trials of the 21 participants (*Figure 6.2.B*).

The target's bearing angle θ was defined as the azimuthal eccentricity (Michaels et al., 2006) of the ball with respect to the participant's straight-ahead (perpendicular to the goal line).

Results

Ball trajectory (*Figure 6.2.A*) systematically influenced players' interception movements (*Figure 6.2.B*), for both straight and curving ball trajectories.

Straight ball trajectories

As can be seen from *Figure 6.2.D*, straight ball trajectories converging onto the same interception location (*Figure 6.2.C*) revealed influences of ball (departure) position on interception patterns, thereby confirming the presence of the angle-of-approach effect (Ledouit *et al.*, 2013) in locomotor interception. This observation was corroborated by an ANOVA on player position at 1.0 s before ball arrival that revealed not only the expected significant main effect of Ball Arrival Position ($F(3, 60) = 256.1, p < .001, \eta^2_p = .93$), but also a significant effect of Ball Departure Position ($F(1, 20) = 132.9, p < .001, \eta^2_p = .87$) as well as a significant interaction between the two ($F(3, 60) = 3.2, p < .05, \eta^2_p = .14$).

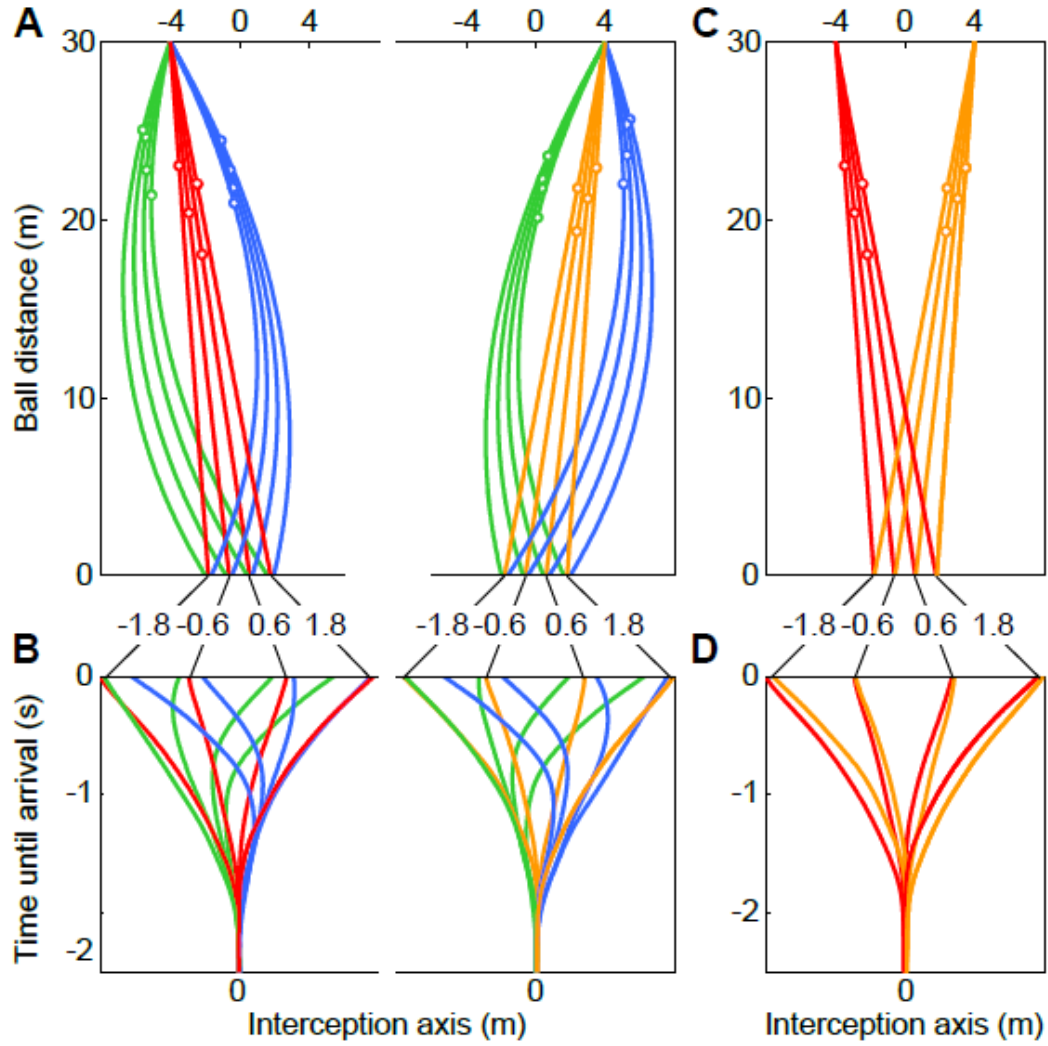


Figure 6.2: Ball trajectories and corresponding interception movements. (A) Bird's-eye view of NS (red), CS (blue), and CCS (green) ball trajectories departing from -4 m (left side of panel) and +4 m (right side of panel) lateral positions, all converging onto the same four arrival positions on the interception axis. Open circles indicate average movement initiation times. (B) Ensemble averages of player position along the interception axis as a function of time until ball arrival for all trajectories. Color code as in (A). Note the mirror symmetry in the interception patterns of the two sides of the panel. (C) Pooling NS ball trajectories starting from -4 m (red) and +4 m (orange) reveals that (D) during the interception movement player position was systematically shifted towards the ball departure position. Same color code as in (C).

Post-hoc Newman-Keuls analysis of this interaction demonstrated a significant influence of Ball Departure Position on player position at each of the four Ball Arrival Positions (p 's $< .001$), even though the effect was somewhat smaller for balls arriving at the inner (± 0.6 m) than at the outer (± 1.8 m) arrival positions. The angle-of-approach effect observed on player position was accompanied by variations in the moment of movement initiation over straight ball trajectories arriving at the same lateral distance (*Figure 6.2.C*): an ANOVA on movement initiation time demonstrated a significant main effect of Ball Arrival Position ($F(3, 60) = 24.8, p < .001, \eta^2_p = .55$) as well as a significant interaction between the factors of Ball Arrival Position and Ball Departure Position ($F(3, 60) = 9.4, p < .001; \eta^2_p = .32$). Post-hoc Newman-Keuls analysis revealed that movement was initiated later (p 's $< .05$) for balls arriving at the inner (± 0.6 m) than at the outer (± 1.8 m) arrival positions. While for each ball arrival position balls departing from the opposite side of the player's initial position tended to give rise to longer movement initiation times, this effect reached significance only for the ball arrival position $+0.6$ m ($p < .001$). Because at least up to movement initiation the time course of optical velocity $d\theta/dt$ was nearly identical for balls converging along straight trajectories onto the same arrival position, the observation of systematic trajectory-specific differences in movement characteristics at each ball arrival position demonstrated that participants did not fully rely on optical velocity $d\theta/dt$; that is, optical position θ also appeared to be involved.

Curving ball trajectories

Inspection of *Figure 6.2.B* revealed that 12 of the 16 curving trajectories led to reversals of movement direction during the players' interceptive actions. For four of these 12 trajectories this change in direction occurred toward the end of the movement, following a slight overshoot. The eight remaining trajectories gave rise to players initially moving away from the future ball arrival position before reversing movement direction. Focusing on the characteristics of these latter reversal movements brought out the following points (*Figure 6.3 and 6.4*).

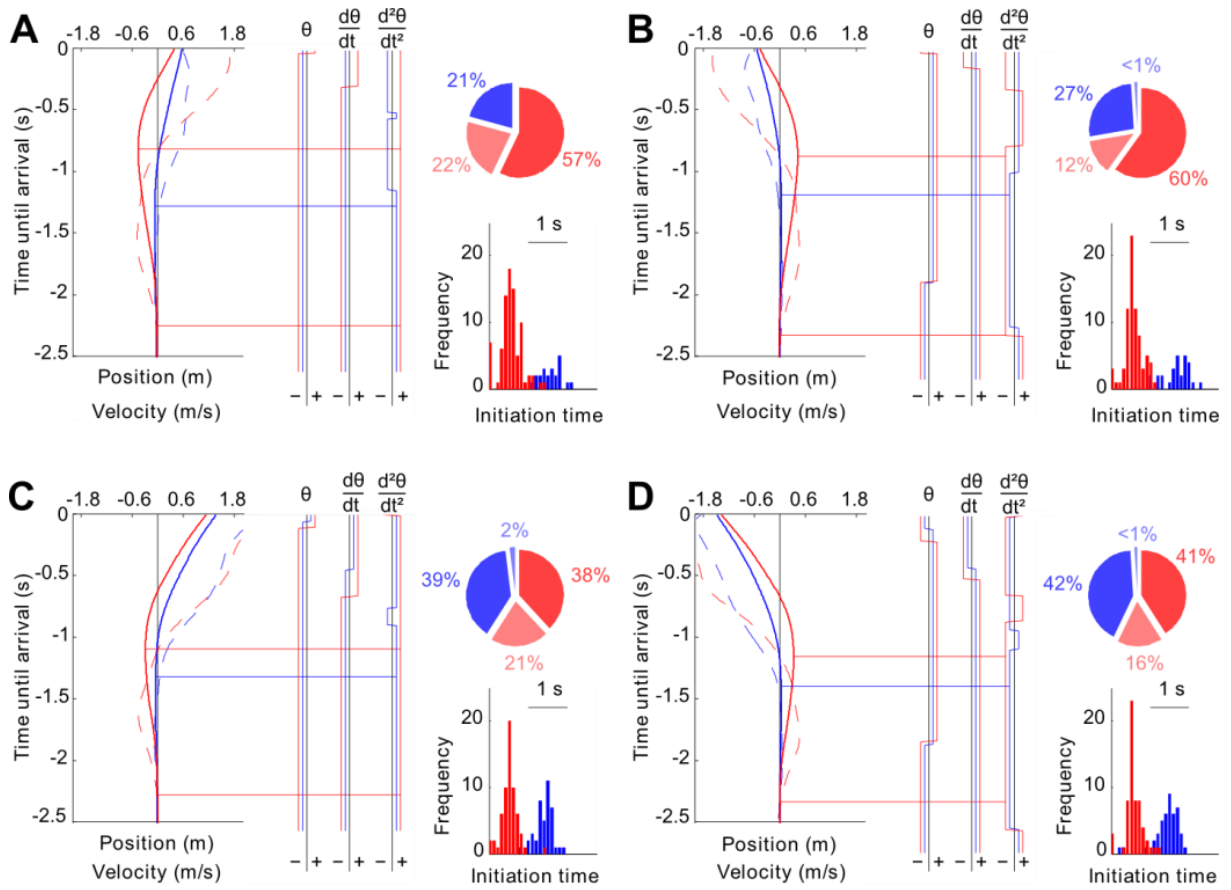


Figure 6.3: Details of interception movements for the four curving trajectories with ball departure at -4 m giving rise to reversal movements. (A) CCS ball trajectory arriving at +0.6 m. (B) CS ball trajectory arriving at -0.6 m. (C) CCS ball trajectory arriving at +1.8 m. (D) CS ball trajectory arriving at -1.8 m. Each panel shows the ensemble averages of player position (solid lines) and velocity (dashed lines) as a function of time until ball arrival for RM (red) and NoRM (blue) trials, accompanied on the same time line by indicator bars of the instantaneous direction of attraction of θ , $d\theta/dt$ and $d^2\theta/dt^2$. Horizontal lines indicate the moments of movement initiation for RM trials (red) and NoRM trials (bleu) as well as the moment of RM peak excursion (red). Pie-chart insets indicate percentages of RM (red) and NoRM (blue) trials, requiring (full color) or not requiring (faded color) attraction to $d^2\theta/dt^2$ in order to explain timing of RM. Histogram insets present frequency distributions of movement initiation times of RM (red) and NoRM (blue) trials.

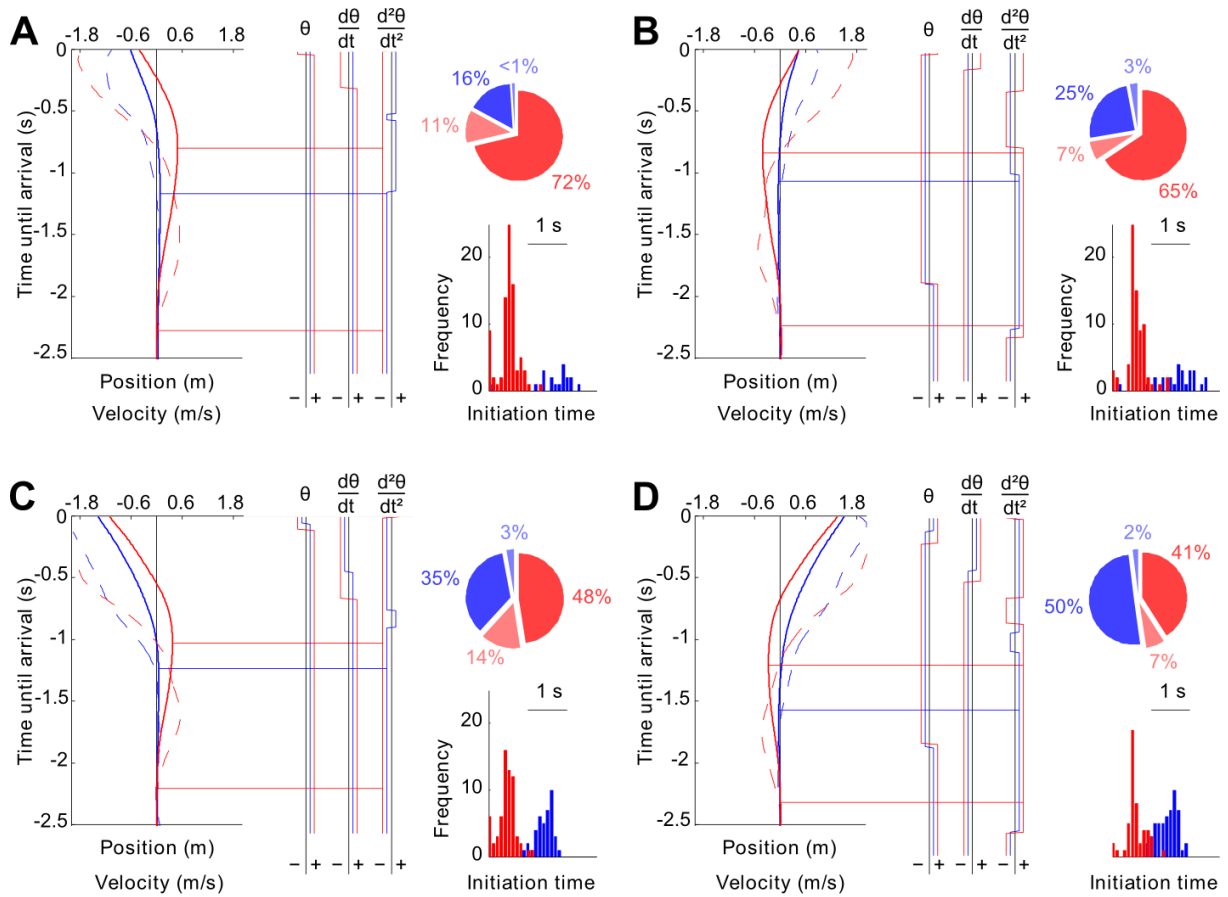


Figure 6.4: Details of interception movements for the four curving trajectories with ball departure at +4 m giving rise to reversal movements. (A) CS ball trajectory arriving at -0.6 m. (B) CCS ball trajectory arriving at +0.6 m. (C) CS ball trajectory arriving at -1.8 m. (D) CCS ball trajectory arriving at +1.8 m. Each panel shows the ensemble averages of player position (solid lines) and velocity (dashed lines) as a function of time until ball arrival for RM (red) and NoRM (blue) trials, accompanied on the same time line by indicator bars of the instantaneous direction of attraction of θ , $d\theta/dt$ and $d^2\theta/dt^2$. Horizontal lines indicate the moments of movement initiation for RM trials (red) and NoRM trials (blue) as well as the moment of RM peak excursion (red). Pie-chart insets indicate percentages of RM (red) and NoRM (blue) trials, requiring (full color) or not requiring (faded color) attraction to $d^2\theta/dt^2$ in order to explain timing of RM. Histogram insets present frequency distributions of movement initiation times of RM (red) and NoRM (blue) trials.

First, while present in the ensemble averages of the full data set presented in *Figure 6.2.B*, reversal movements (RM) were not always observed at the level of the individual trials. Separating RM trials and NoRM trials^k for each ball trajectory revealed bimodal distributions of initiation times, indicating that RM trials were initiated considerably earlier than NoRM trials (see histogram insets in *Figure 6.3 and 6.4*). This pattern of results was not due to between participants differences: the presence of both RM and NoRM trials was observed within the individual participants. The number of trials with reversals varied over trajectories, for averages of 56.4% and 76.7% for balls arriving at the outer (± 1.8 m) and inner (± 0.6 m) arrival positions, respectively (see pie-chart insets in *Figure 6.3 and 6.4*).

Second, in NoRM trials the movement appeared to be driven by optical acceleration $d^2\theta/dt^2$ rather than by optical velocity $d\theta/dt$: at the time of movement initiation the latter specified movement in the opposite direction (see indicator bars in *Figures 6.3 and 6.4*). This reliance on optical acceleration $d^2\theta/dt^2$ was observed in 95.4% of the NoRM trials. RM trials, on the other hand, appeared to be initially driven by optical velocity $d\theta/dt$ (consistently specifying movement away from the future arrival position at the time of movement initiation for the full set of RM trajectories). However, the subsequent reversing of movement direction again appeared to be driven by optical acceleration $d^2\theta/dt^2$ as even at the time of peak excursion optical velocity $d\theta/dt$ was still specifying movement in the same direction, away from the future ball arrival position (see indicator bars in *Figures 6.3 and 6.4*). This characteristic was observed in 79.2% of the RM trials.

Discussion

Overall, the above analyses demonstrated that the control of lateral interception seemed to require concurrent reliance on several informational variables.

For straight ball trajectories the behavioral effects observed (*Figures 6.2.C and 6.2.D*) implicated both optical position θ and optical velocity $d\theta/dt$. Interestingly, similar results were reported by Fajen and Warren (2004, 2007; also see Land & Collet, 1974).

^k Identification of RM and NoRM trials was based on the criterion for movement initiation described in the methods section: trials were qualified as RM when an initial movement of at least 0.11 m was made in a direction away from the future ball arrival position.

Fajen and Warren (2004, 2007) noted that in their experimental setting targets following straight trajectories that led them to cross the participants' initial movement direction gave rise to S-shaped bends in the interception paths. In order to capture such (target-position driven) effects within their steering model of locomotor interception, they incorporated a 0.5-s sigmoidal latency function on $d\theta/dt$ suggested to correspond to “a visual delay to detect that the target is moving and a locomotor delay to overcome the inertia of the body” (Fajen & Warren, 2007, p. 311). When balls moved along straight trajectories in the present study, participants initiated their movements after 0.97 s of ball flight on average, for a range of 0.82 to 1.21 s. Thus, without considerably lengthening of its rise time (well beyond 1 s), the latency function proposed by Fajen and Warren (2007) cannot explain the angle-of-approach effects observed here. The question why a combination of optical position θ and optical velocity $d\theta/dt$ information would be used over an extended period of time, rather than the presumably available $d\theta/dt$ information *per se*, therefore remains unanswered.

For curving ball trajectories the behavioral effects observed (*Figures 6.3 and 6.4*) implicated both optical velocity $d\theta/dt$ and optical acceleration $d^2\theta/dt^2$. While these observations could be captured by a model of control based on (perhaps time-evolving) combinations of $d\theta/dt$ and $d^2\theta/dt^2$ information, such a combinatorial approach appears to lack a principled foundation. It also begs the question why interception of curving trajectories would not simply rely on $d^2\theta/dt^2$ information: if indeed accessible, this would allow avoiding the advent of reversal movements altogether. Given the consensus in the literature that optical acceleration cannot be detected accurately (Brouwer et al., 2002; Calderone & Kaiser, 1989; Werkhoven et al., 1992; Zaal et al., 2012), it is not clear how $d^2\theta/dt^2$ could be used at all, either alone or in combination with other informational variables.

We suggest an alternative account. Rather than limiting potential informational variables to integer-valued time derivatives of θ , we propose that information may cover the full continuum of states offered by fractional-order time derivatives (Beek et al., 1998; Jacobs et al., 2012; Podlubny, 1999; 2002). In this perspective, interception is controlled by nulling an informational variable $d^\alpha\theta/dt^\alpha$ of a trajectory-specific fractional order α , where $\alpha \in \mathbb{R}^+$.

Model

We developed the following model as a proof of concept for movement control based on trajectory-specific fractional-order information. We started from the attractor dynamics:

$$d^2X/dt^2 = G \cdot t_c^\alpha \cdot d^\alpha \theta_{\Delta t}/dt^\alpha \quad (1)$$

in which d^2X/dt^2 is player acceleration along the interception axis, G is a gain coefficient, and t_c is a characteristic time constant raised to the power α ; $d^\alpha \theta_{\Delta t}/dt^\alpha$ is the α^{th} -order time derivative of θ at a visuomotor delay Δt earlier. The gain coefficient G has the same dimension as d^2X/dt^2 . Because α determines the dimension of $d^\alpha \theta/dt^\alpha$, including t_c^α on the right-hand side of the equation balances dimensions. For each trajectory the fractional order α is determined at each point in time by having α start at 0 and increase linearly (slope s_α) over time until the magnitude of $d^\alpha \theta/dt^\alpha$ becomes smaller than a criterion value:

$$|d^\alpha \theta/dt^\alpha| < \varphi/t_c^\alpha \quad (2)$$

in which φ is the optical size of the ball, increasing during approach. Note that prior to movement initiation the instantaneous value of $d^\alpha \theta/dt^\alpha$ is determined by the way the ball trajectory unfolds with respect to the stationary player. After movement initiation the characteristics of ball and player motion co-determine the instantaneous value of $d^\alpha \theta/dt^\alpha$.

In parallel to the order progression that leads to the fractional order that the system settles on for the specific ball trajectory, after a dead period t_m , the moment of movement initiation is determined when the magnitude of required player acceleration exceeds a threshold:

$$|d^2X/dt^2| > k_{ini}/t - t_m \quad (3)$$

in which k_{ini} is a gain coefficient, t is time and t_m is the duration of an initial dead period during which movement cannot be initiated.

In order to implement the model, fractional derivatives of θ needed to be calculated. For reasons of simplicity we used an algorithm based on Euler's generalization (Dalir & Bashour, 2010):

$$\frac{d^n x^m}{dx^n} = \frac{\Gamma(m+1)}{\Gamma(m-n+1)} x^{m-n}$$

in which Γ is the gamma function. Fractional derivatives of time series of θ can thus directly be computed using polynomials¹. To this end, for each point in time, a fourth-order polynomial was fitted through the values of θ at the preceding time steps. The coefficients c_m of the obtained polynomial were used to compute the fractional derivative according to:

$$\frac{d^\alpha}{dt^\alpha} \theta(t) = \sum_{m=0}^4 c_m \left(\frac{\Gamma(m+1)}{\Gamma(m-\alpha+1)} t^{m-\alpha} \right)$$

in which α is the fractional order of the time derivative of θ , t is time, and m is the order of each term in the polynomial. Until sufficient values were available after onset of ball motion, the polynomial was fit through the first 34 time steps (during which the player never moved) for the computation of the fractional derivative at each time step.

The model (i.e., *Eq. 1 to 3*) was fitted to the ensemble averages of the interception patterns for all 24 ball trajectories, including only the RM trials for trajectories with RM and NoRM behaviors. Two parameters were set at fixed values ($\Delta t = 0.1$ s and $t_m = 0.23$ s) while the remaining four parameters were optimized ($s_\alpha = 5.4$ s⁻¹, $G = 160$ m·s⁻², $t_c = 0.23$ s and $k_{ini} = 0.255$ m·s⁻¹) using sequential quadratic programming. Subsequent model simulations using this unique set of parameter values provided adequate overall results (*Figure 6.5*).

¹ In order to ascertain that our results did not depend on the specific algorithm used for calculating the fractional-order derivatives of θ , we also ran the model with another, computationally more intensive matlab routine (fgl_deriv.m; MathWorks reference 45982-fractional-derivative) based on a vectorized Grunwald-Letnikov definition (Podlubny, 1999). The algorithm used did not qualitatively affect the results obtained.

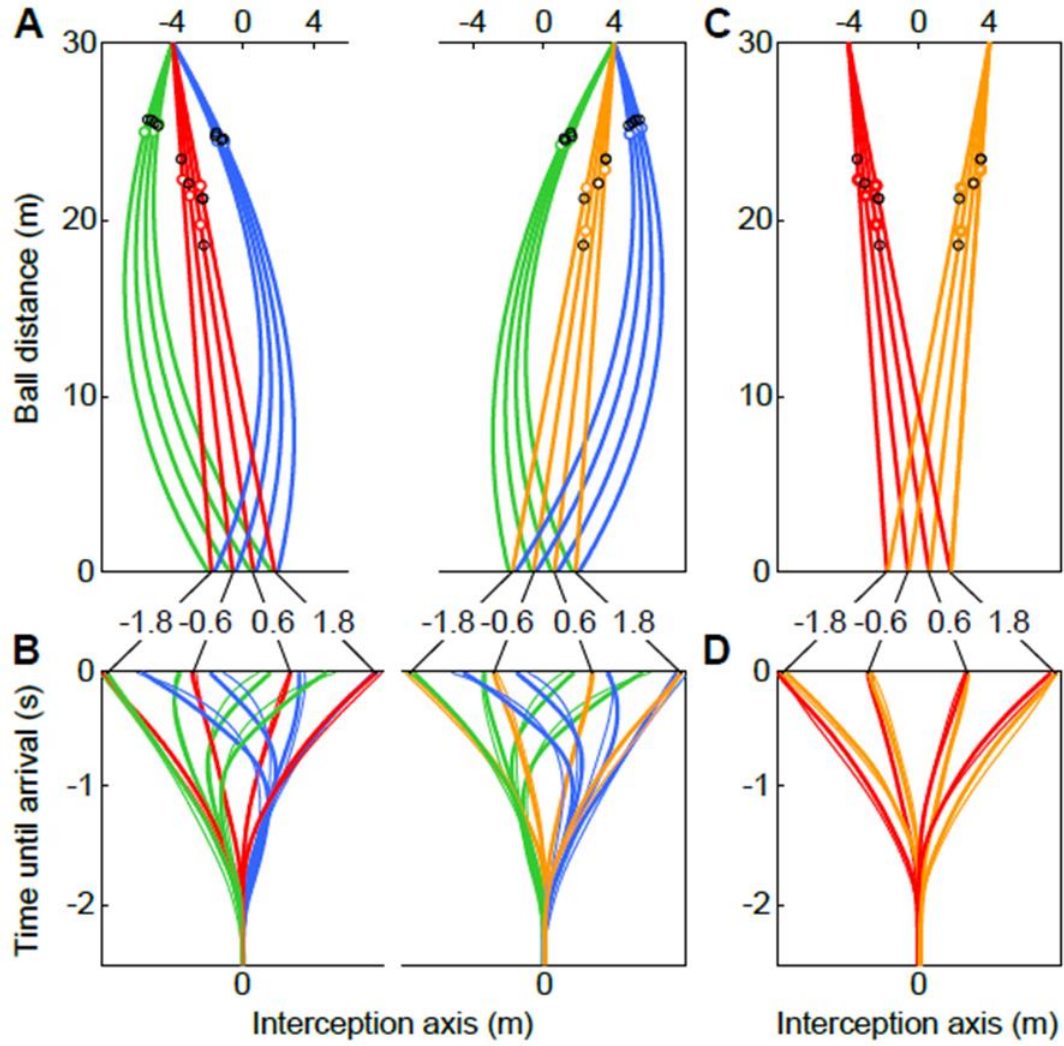


Figure 6.5: Ball trajectories and corresponding observed and simulated interception movements, including only the RM trials for trajectories giving rise to RM and NoRM behaviors. (A) Bird's-eye view of NS (red and orange), CS (blue), and CCS (green) ball trajectories departing from -4 m (left side of panel) and +4 m (right side of panel) lateral positions, all converging onto the same four arrival positions on the interception axis. Colored circles indicate average movement initiation times; black circles indicate model-predicted movement initiation times. (B) Ensemble averages (fat lines) and model-generated simulations (thin lines) of player position along the interception axis as a function of time until ball arrival for all trajectories. Color code as in (A). (C) Pooling straight ball trajectories starting from -4 m (red) and +4 m (orange) reveals that (D) the model adequately captured the observed angle-of-approach effect. Same color code as in (C).

Simulations satisfactorily reproduced the interception patterns observed for all trajectories ($R^2 = 0.976 \pm 0.038$ and $RMSE = 0.054 \pm 0.021$ m). Additionally, timing was accurately captured. For each ball trajectory, predicted initiation time closely matched observed initiation time, $R^2 = 0.950$ and mean error = -0.014 ± 0.046 s. For the trajectories giving rise to movement reversals, the moment of peak excursion was accurately predicted, $R^2 = 0.973$ and mean error = 0.031 ± 0.029 s. When the model was initiated at the mean movement initiation times of the NoRM trials, the simulated trajectories showed no reversal movements.

Table 6.1: Numerically determined fractional order α for the 24 ball trajectories.

	BDP -4 m				BDP +4 m			
	BAP (m)				BAP (m)			
	-1.8	-0.6	+0.6	+1.8	-1.8	-0.6	+0.6	+1.8
NS	1.03	0.97	0.97	0.92	0.92	0.97	0.97	1.03
CS	1.78	1.78	1.73	1.67	1.84	1.78	1.78	1.73
CCS	1.73	1.78	1.78	1.84	1.67	1.73	1.78	1.78
CCS	1.73	1.78	1.78	1.84	1.67	1.73	1.78	1.78

BDP: Ball Departure Position. BAP: Ball Arrival Position. NS: No spin. CS: Clockwise spin. CCS: Counter-clockwise spin. Note the mirror symmetry in the α values corresponding to the mirror symmetry in the trajectories departing from -4 m and +4 m.

In the model, order α generally increased monotonically before settling onto a trajectory-specific value that was then maintained throughout the interceptive action (see Table 6.1 for final values of α). However, due to the spatiotemporal characteristics of certain ball trajectories, the temporal evolution of α revealed a short-duration, transitory plateau for the four CS ball trajectories departing from -4 m and for their mirror counterparts, the four CCS trajectories departing from +4 m. This plateauing of α at values between 0.7 and 0.8 observed for these particular (curving) ball trajectories resulted from small absolute $d^\alpha\theta/dt^\alpha$ values occurring in the early stage of ball flight, when the ball was on one side of the player while its velocity was driving it to the other side. As over these trajectories the ball quickly approached and subsequently crossed the (still stationary) player's initial position, the magnitude of $d^\alpha\theta/dt^\alpha$ rapidly began to

grow again. Driven by *Eq. (2)*, α therefore started to increase again and continued to do so until it settled onto a trajectory-specific value that was then maintained throughout the interceptive action.

The observed angle-of-approach effect for balls following straight trajectories to the same arrival position while coming from different departure positions (*Figures 6.5.C and 6.5.D*) resulted from the presence of trajectories with $\alpha < 1$. The apparent initial dependence on optical velocity $d\theta/dt$ and subsequent switch to optical acceleration $d^2\theta/dt^2$ underlying the observed RM behavior for curving trajectories in fact resulted from continuous reliance on information with $1 < \alpha < 2$.

General Discussion

The purpose of the model developed in the present contribution was to provide proof of concept for our hypothesis of control of interception based on fractional-order information nulling. *Eq. (1)* captures the information-based attractor dynamics, defining how player acceleration (d^2X/dt^2) depends on information ($d^\alpha\theta/dt^\alpha$), in its simplest form: beyond a general gain G it only includes a time constant t_c raised to the power α that is required to maintain dimensional homogeneity. *Eq. (1)* is the part of the model that can be compared to existing behavioral dynamics models of interception, in both their direction-constrained (Chardenon et al., 2005, *Eq. 1*, p. 53; Bastin et al., 2006, *Eq. 1*, p. 720; Bastin et al., 2008, p. 302; Morice et al., 2010, *Eq. 1*, p. 398) and speed-constrained versions (Fajen & Warren, 2007, *Eq. 5*, p. 310 combined with the latency function described in *Eq. 6*, p. 311). While most models (Bastin et al., 2006; 2008; Fajen & Warren, 2007; Morice et al., 2010) incorporate a damping term in the attractor dynamics, ours (currently) does not, for a simple reason: Fitting systematically yielded a damping coefficient of negligible size. Future work will have to demonstrate whether the inconsequential role of damping observed in the present context is related to task constraints or to other factors. As mentioned earlier, in order to capture the observed target-position-dependent effects on interception patterns, Fajen and Warren (2007) included a latency function on $d\theta/dt$ in their steering model. Our model based on fractional-order information does not require such an extension^m.

^m Finally, Fajen and Warren's (2007) model also incorporates a distance term (weighting the influence of a distant target more heavily) to avoid sluggish turns when the target is far away. Note that they

What makes our model conceptually different from existing models is not only that we open up the potential information space from isolated (category-like) integer time derivatives to the continuum of fractional-order time derivatives (Jacobs et al., 2012). Taking the idea of a continuum seriouslyⁿ, we also allow different situations to give rise to reliance on information of a different fractional order. Thus, in our model we suggest that on each occasion the system tunes in to (i.e., self-selects) the appropriate order of the information to be nulled. This self-tuning to an appropriate fractional order of the information is captured in our model by *Eq. (2)*, stating that the order α of information increases when $d^\alpha\theta/dt^\alpha$ exceeds a threshold, defined by the ratio of current optical target size φ and t_c^α . Note that substitution of *Eq. (2)* in *Eq. (1)* reveals that the threshold corresponds to a (required) player acceleration of G times φ . Thus, when the acceleration required to intercept the target is too large, the order α of the information is increased. Because very short stimulus exposure times only allow detection of position, in building our model we assumed that α starts from zero. The choice to increase α following a linear function, characterized by slope s_α , is at present also but a simplicity assumption. For the set of conditions explored in the present study, after movement onset the value of α nulled by model did not change over the course of movement. However, a change in the characteristics of ball motion (such as a sudden change in ball speed and/or direction) may be expected to lead to a change in α . The present formulation of the α -tuning mechanism (*Eq. (2)*) allows for an increase but not for a decrease in α during the interceptive action. Future work will have to determine whether α may indeed change when ball trajectory characteristics change and, if so, whether α then may decrease as well as increase. Experimental evidence in favor of a decrease in α over the course of an interceptive action would, of course, require a reformulation of the α -tuning mechanism.

With the information-based attractor dynamics being defined by *Eq. (1) and (2)* at each moment in time for each ball trajectory, we were able to determine an effective criterion for movement initiation captured by *Eq. (3)*, the last element of our model: the

demonstrate that inclusion of the distance term is not required for the range of target distances and speeds explored in their interception experiments (see Fajen & Warren, 2004).

ⁿ When limited to isolated integer-order derivatives, it may seem parsimonious to choose, for a given set of conditions, between categorically different interception strategies such as classical pursuit (nulling zeroth-order information) and classical interception (nulling first-order information). Allowing for fractional-order derivatives eliminates these categorical differences and, thereby, the need of having to choose between them.

player begins to move when the magnitude of required acceleration exceeds a threshold value. Incorporating a dead period during which movement simply cannot be initiated, the threshold value decreases over time so that movement is eventually initiated even for a ball trajectory requiring only a small amount of movement for interception. Note that such an action-relevant criterion (Bootsma, Fayt, Zaal, & Laurent, 1997) allows the whole action sequence (from not moving, via starting to move at a particular moment, to moving in a particular way) to be understood within the same logic. It is indeed this logic that allows our model to reproduce the observed behavioral patterns (*Figure 6.5*). Surprisingly, most existing studies (and a fortiori models) of locomotor interception remain silent on the timing of movement initiation (see Collett & Land, 1978, for an exception); at best they incorporate a sigmoidal time-dependent activation function (Bastin *et al.*, 2006; 2008; Morice *et al.*, 2010). We suggest that this lack of interest with respect to the timing characteristics of locomotor interception is related to the specifics of the experimental paradigms used in which analysis begins when agents are already moving (e.g., Bastin *et al.*, 2006; 2008; Boeddeker *et al.*, 2003; Chardenon *et al.*, 2002; 2004; 2005; Fajen & Warren, 2004; Haselsteiner *et al.*, 2014; Kane & Zamani, 2014; Kane, Fulton, & Rosenthal, 2015; Lenoir *et al.*, 1999; 2002; Morice *et al.*, 2010; Olberg *et al.*, 2000; Tucker, Tucker, Akers, & Enderson, 2000). Moreover, for walking participants the data are generally binned over considerable time intervals in order to remove the cyclical variations of the step cycle; Fajen and Warren (2004, 2007) in fact time-normalized their data. Thus, by including a criterion for movement initiation such as the one provided by *Eq. (3)*, we hope that our model may incite future work on locomotor interception to consider not only the patterning but also the timing of behavior.

We conclude that control based on fractional-order information nulling provides a unifying framework, explaining the ball-trajectory effects observed here and in the literature for straight (Chardenon *et al.*, 2004; 2005; Fajen & Warren, 2004) and curving trajectories (Bastin *et al.*, 2006; 2008; Casanova *et al.*, 2015; Lenoir *et al.*, 2005; Morice *et al.*, 2010). Breaking away from the traditional combinatorial approach (e.g., Beek, Dessing, Peper, & Bullock, 2003; also see the sequence of model developments in Dessing *et al.*, 2002; 2004; 2005; 2009), fractional derivatives fill the space between classical integer-order derivatives, thereby providing a powerful tool to identifying intermediate informational states (Jacobs *et al.*, 2012). The neurophysiological plausibility of the fractional-order dynamics was first demonstrated by Anastasio (1994;

1998; Anastasio & Correia, 1994) in his work on the vestibulo-ocular reflex. More recently, the firing rate of neocortical pyramidal neurons has been reported to encode slowly varying stimulus statistics through fractional-order differentiation (Lundstrom, Higgs, Spain, & Fairhall, 2008). We therefore conclude that reliance on fractional-order information as proposed in the present contribution is, at least, neurophysiologically plausible.

Fractional-order information may also be used in the locomotor interception of balls following curving trajectories along the sagittal plane, for which a heuristic of keeping constant the rate of change of the tangent of optical elevation (often referred to as optical velocity) has been proposed (Chapman, 1968; Fink, Foo, & Warren, 2009; McLeod, Reed, & Dienes, 2006; Michaels & Oudejans, 1992). However, the plausibility of a control strategy implementing this interception heuristic in the form of nulling vertical optical acceleration (McLeod et al., 2006; Michaels & Oudejans, 1992) has been questioned on the basis of the human visual system's low sensitivity to optical acceleration (Brouwer et al., 2002; Calderone & Kaiser, 1989; Werkhoven et al., 1992; Zaal et al., 2012). Human observers' ability to detect changes in optical velocity has led to the formulation of alternative perceptual candidates, generally based on changes in velocity scaled to average velocity (Babler & Dannemiller, 1993; Brouwer et al., 2002; Calderone & Kaiser, 1989; Schmerler, 1976). To date, however, the variable that the visual system relies on to detect changes in optical velocity has not been identified (Zaal et al., 2012). The current framework intimates that reliance on information of a fractional order of about 1.8, as identified for the laterally curving trajectories of the present study, might characterize the informational variable underlying detection of change in velocity.

The proposed account suggests that combinations of ball trajectory characteristics and timing constraints may lead to fractional orders of the informational variable filling a continuum of possibilities. Generalizing, this implies that conceptual models of motion perception (Van Doorn & Koenderink, 1982) could benefit from considering sensitivity to fractional (rather than exclusively integer) order derivatives. The account may even provide a simple solution to the 40-year old enigma that constant velocity is not perceived as such (Runeson, 1974).

7. Discussion Générale

L'objectif de ce travail était de comprendre les mécanismes sous-tendant la stratégie perceptivo-motrice engagée dans une action d'interception d'un mobile en approche. Objectif qui nécessitait de décliner une problématique autour de deux questions : une première quant à la nature de l'information visuelle qui guide le mouvement de l'agent ; une seconde quant à la façon dont cette information est utilisée. Cette double hypothèse est contenue dans le travail de modélisation de la stratégie engagée, formalisation des interactions agent-environnement. La simulation des deux modèles construits (un premier relatif aux tâches d'interception latérale manuelle ; un deuxième aux tâches d'interception locomotrice) devait nous permettre de tester cette double hypothèse en comparant les simulations réalisées avec les données expérimentales recueillies. Dans ce dernier chapitre (Chapitre 7), nous reviendrons sur les principaux résultats expérimentaux obtenus, sur les hypothèses émises pour les interpréter et enfin sur leur modélisation. Puis nous conclurons après avoir fait une synthèse de ce travail de thèse.

7.1. Interception latérale manuelle

Nous rappelons le singularisme des interceptions latérales manuelles : le point d'observation est considéré comme fixe, sans déplacement, et le succès de la tâche requiert l'annulation de la distance entre la main et la position du mobile lorsque celui-ci franchit l'axe de déplacement de la main de l'agent ; base conceptuelle ayant des conséquences directes sur la formalisation des interactions agent-mobile (cf. Chapitre 2).

7.1.1. Rappel des principaux résultats

La première étude expérimentale, publiée dans la revue *PLoS One* (Ledouit *et al.*, 2013), présentait quatre expériences attachées à l'observation du mouvement manuel d'interception latérale. L'originalité de cette étude par rapport à celles de la littérature est qu'elle permettait l'observation de mouvements d'interception de mobiles se déplaçant dans un plan fronto-parallèle. L'avantage était la possibilité de présenter aux participants des trajectoires rectilignes et ainsi de pouvoir identifier les variables XB_0 et XB_1 et leur évolution au cours du temps. En accord avec la littérature relative à l'étude de trajectoires pendulaires (Peper *et al.*, 1994; Jacobs et Michaels, 2006 ; Michaels *et al.*, 2006) ou à l'étude de trajectoires rectilignes dans le plan transverse (Montagne *et al.*, 1999; Arzamarski *et al.*, 2007), les patrons cinématiques de mouvement de la main variaient quand les participants interceptaient des mobiles convergeant vers le même point d'arrivée mais empruntant des trajectoires différentes. Cet effet d'angle d'approche a été démontré avec la première expérience de l'étude. Arzamarski *et al.* (2007) ont expliqué cet effet par l'existence d'un biais dans la perception de la variable SAE XB_1 (la position de franchissement de l'axe du mouvement d'interception par le mobile si sa direction de déplacement est maintenue constante). Ils ont effectivement montré l'existence d'un biais dans l'extrapolation de l'intersection de bâtonnets avec l'axe de mouvement de la main. Les participants sous-estimaient la distance de ce point d'intersection par rapport à la position initiale de leur main. Avec la deuxième expérience nous avons aussi observé ce type de résultat pour l'extrapolation de segments statiques virtuels. Pour cette tâche les participants sous-estimaient aussi la distance entre le point d'intersection du segment avec leur axe de déplacement et la position initiale de leur main. Cette sous-estimation augmentait avec la hauteur du segment sur l'écran de la tablette graphique et elle augmentait aussi avec l'inclinaison du segment. Cette augmentation était systématique et nous a permis de contrôler ce biais perceptif. En modifiant l'inclinaison des segments selon leur hauteur nous avons montré que nous étions capables de faire estimer par les participants une distance que nous désirions (expérience 3). Enfin, à partir de ces segments modifiés et pour lesquels le biais était contrôlé, nous avons construit des trajectoires que les mobiles pouvaient emprunter. Et pour intercepter ce type de trajectoires, un effet d'angle d'approche a

continué d'être observé (expérience 4). La particularité de ces trajectoires dynamiques était d'être légèrement curvilignes, de telle sorte qu'à chaque instant la variable $SAE\ XB_1$ perçue était un attracteur positionnel constant et commun à toutes les trajectoires ayant la même arrivée sur l'axe d'interception. Ainsi le fait de continuer à observer un effet d'angle d'approche contestait la possibilité d'une influence unique de la variable XB_1 , même nuancé par l'existence d'un biais perceptif.

Dans la deuxième étude expérimentale, qui n'est que préliminaire et ne comportait qu'une seule expérience, nous avons rapporté trois résultats importants. Le premier, attendu, est cet effet systématique de l'angle d'approche de la trajectoire sur le patron cinématique du mouvement de la main. Le protocole expérimental étant proche, bien que légèrement différent, de celui de la première étude ; il aurait été surprenant de ne pas observer cet effet. Cela dit, toutes les études relatives à l'interception manuelle de trajectoires rectilignes ont à notre connaissance montré cet effet d'angle d'approche, que l'on peut donc qualifier de persistant (Montagne *et al.*, 1999; Arzamarski *et al.*, 2007). Deuxième résultat important, nous avons observé des patrons récurrents quant aux différences dans les temps d'initiation moyens. En effet certaines trajectoires, particulièrement celles qui traversaient l'axe orthogonal initial de la main pour arriver à un point d'interception proche de la position initiale des participants, amenaient ceux-ci à initier leur mouvement significativement plus tard par rapport à d'autres trajectoires. De plus, ces trajectoires laissaient apparaître une variabilité plus importante lors de l'analyse des temps d'initiation de tous les essais relatifs. Enfin, le dernier résultat important était l'observation d'un taux non négligeable (34%) de mouvements de rebroussement opérés pour intercepter des balles dont le point d'interception correspondait à la position initiale de la main. Le mouvement de rebroussement se caractérisait par un premier mouvement significatif dans la direction de la position de départ du mobile suivi d'un deuxième mouvement de retour vers la position initiale de la main pour réussir l'interception. Lorsque les positions de départ du mobile étaient les plus éloignées par rapport à la position initiale de la main ($\pm 15\text{cm}$), ce taux était de 45%, contre 23% pour les trajectoires avec des points de départ moins distants ($\pm 5\text{cm}$). Aussi, nous avons observé que pour ces 180 essais au total pour lesquels les participants ont opéré des mouvements de rebroussement, les mouvements avec les plus larges

amplitudes étaient réalisés lorsque les participants avaient initié leur mouvement de façon particulièrement précoce.

7.1.2. Discussion

La première étude expérimentale a permis de montrer que l'on pouvait difficilement concevoir que la variable SAE XB_1 soit la seule et unique variable guidant les régulations du mouvement nécessaires pour intercepter un mobile en approche. Pour des trajectoires rectilignes dans le plan transverse ou fronto-parallèle dans le cas de notre étude, la variable SAE XB_1 est un attracteur positionnel physique correspondant au futur point d'interception. Ainsi, les modèles des mouvements d'interception construits avec cette variable SAE devraient prédire des patrons cinématiques similaires quant à l'interception de balles empruntant des trajectoires rectilignes différentes mais arrivant au même endroit. Ces modèles ne pourraient ainsi pas prédire l'effet d'angle d'approche pourtant souvent observé (Montagne *et al.*, 1999; Arzamarski *et al.*, 2007).

Nous rappelons que pour de nombreux travaux relatifs à l'interception latérale manuelle (Peper *et al.*, 1994 ; Jacobs et Michaels, 2006 ; Michaels *et al.*, 2006; Dessing *et al.*, 2005 ; Dessing *et al.*, 2009) les trajectoires étudiées présentaient la particularité d'être pendulaires. La conséquence de l'aspect pendulaire d'une trajectoire (mouvement généré par la force gravitaire) est une évolution de l'angle φ différente comparée à celle d'une trajectoire dans le plan transverse. Il en résulte que la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ ne spécifie pas la variable SAE XB_1 (la position de franchissement de l'axe du mouvement d'interception par le mobile si sa direction de déplacement est maintenue constante). Michaels *et al.* (2006) ont effectivement montré que $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ avait des valeurs différentes au cours du temps pour des trajectoires pendulaires différentes arrivant au même endroit (voir *Figure 2.2.4*). Il pourrait d'ailleurs s'agir de la raison qui aurait amené Jacobs et Michaels (2006) et Michaels *et al.* (2006) à retenir $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ comme variable optique responsable des régulations du mouvement d'interception manuelle, l'effet d'angle d'approche sur la cinématique de la main pouvait être simulé (l'évolution différente $cal * (d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$ pour des trajectoires se dirigeant vers le même point d'arrivée pouvait générer des patrons cinématiques de la main différents).

En revanche, dans le plan transverse, pour des trajectoires rectilignes différentes avec le même point d'arrivée, la variable $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ spécifie la variable SAE XB_1 et est donc constante au cours du temps et commune à toutes ces trajectoires. Cette spécificité des trajectoires rectilignes nous a amené à choisir d'étudier l'interception latérale manuelle dans le plan fronto-parallèle afin d'avoir la possibilité de discriminer les influences respectives de XB_0 et XB_1 . Arzamarski *et al.* (2007) ont proposé que la variable optique $cal * (d\theta/dt)/(d\phi/dt)$ (qui spécifiait effectivement la variable SAE XB_1 dans leur étude expérimentale où le mobile se déplaçait dans un plan transverse) guidait les mouvements d'interception, mais qu'un biais était responsable de l'effet d'angle d'approche sur la cinématique de la main.

Avec les expériences 2, 3 et 4 de la première étude nous avons obtenu des arguments qui nous ont permis de remettre en cause cette interprétation. En effet nous avons montré qu'un biais existait en effet (expérience 2 : erreur dans l'estimation du point d'intersection entre un segment statique et l'axe de déplacement de la main des participants). L'erreur augmentait avec la hauteur des segments sur l'écran ainsi qu'avec leur inclinaison. La possibilité de faire un parallèle entre l'extrapolation de segments statiques et l'interception de balles dynamiques est d'ailleurs tout à fait discutable. Il s'agit d'une limite paradigmatique qu'il nous faut concéder, mais nous ne nous sommes qu'inspiré du concept expérimental d'Arzamarski *et al.* (2007) afin de reproduire qualitativement leurs résultats, et d'aller plus loin dans leur compréhension. Dans leur logique, le biais perceptif serait plus important en début de trajectoire (segments éloignés) et il augmenterait avec l'angle d'approche de la trajectoire (segments plus inclinés). Le biais perceptif serait donc fonction de l'angle d'approche et expliquerait son effet sur les patrons cinématiques des mouvements d'interception latérale manuelle de mobiles empruntant des trajectoires rectilignes. Mais nous avons montré qu'il était possible de contrôler ce biais non pas en l'annulant, mais en le prenant en compte et en faisant pointer les participants où nous le désirions (expérience 3 : en considérant l'augmentation linéaire de l'erreur d'estimation des segments avec leur distance et leur inclinaison, nous avons créé des familles de segments pour lesquels les participants indiquaient des points d'extrapolation que nous avons défini au préalable). Toujours malgré l'incertitude d'un parallèle possible entre extrapolation et interception, nous avons construit à partir des segments modifiés des trajectoires légèrement courbées et pour lesquelles la variable SAE XB_1 perçue (avec le biais pris en compte) devait être un

attracteur positionnel constant pour toutes les trajectoires arrivant au même point d'interception. Mais l'effet de trajectoire a persisté. En effet, malgré leur légère courbure sensée contrôler le biais perceptif de la variable XB_1 , les trajectoires arrivant au même point mais avec des départs différents montraient un effet de trajectoire sur la cinématique de la main. Cet effet de trajectoire ne peut pas s'expliquer par l'utilisation de la variable SAE XB_1 ou même par l'utilisation de la variable SAE XB_1 perçue avec un biais.

Cette étude expérimentale remettait ainsi en cause les modèles construits en incluant celle-ci, sans dire qu'elle ne joue pas un rôle dans les actions d'interception. Finalement, ce que nous permettait d'affirmer cette étude était que ni la variable XB_0 , ni la variable XB_1 ne pouvaient expliquer seules les effets de trajectoires rectilignes sur le mouvement d'interception latérale manuelle. Nous devons alors reconsidérer l'idée de combinaison entre une information d'ordre zéro (spécifiant XB_0) et une information de premier ordre (spécifiant XB_1).

La deuxième étude expérimentale nous a permis d'avancer l'idée de l'utilisation d'une variable SAE d'ordre intermédiaire, celle-ci nous permettant d'expliquer avec cohérence l'effet d'angle d'approche, la probabilité d'observer des mouvements de rebroussements et les différences observées pour les temps d'initiation. L'idée proposée est qu'entre XB_0 et XB_1 existerait un continuum de variables SAE. La littérature exprimait que l'agent pourrait prendre en compte la position d'un mobile en approche (suggérant l'utilisation d'une information d'ordre zéro), ou utiliser une variable SAE impliquant la prise en compte des variations de la position de ce mobile (suggérant l'utilisation d'une information de premier ordre). Mais nous nous sommes demandé pourquoi percevoir des variations de position d'un objet nécessitait d'utiliser une variable intégrant entièrement la vitesse latérale du mobile. Pourquoi ne sommes-nous pas simplement capable de percevoir un certain taux de variation, plus ou moins important selon la situation environnementale ?

Afin de montrer ce qu'offrait la considération du concept d'ordre intermédiaire, nous avons développé un modèle basé sur le concept de vitesse requise (cf. Chapitre 2) construit autour de la variable SAE XB_α , α représentant un ordre intermédiaire parmi un continuum d'états possibles. Pour cette étude et après optimisation des constantes du modèle, α prendrait une valeur autour de 0.8. Un α avec pour valeur 0.8 signifie

qu'un taux assez conséquent de variations de position est perçu, sans que la variable SAE utilisée soit XB_1 . Le modèle prédisait les effets d'angle d'approche. Les participants percevaient le même taux de variation (spécifié par la variable $XB_{0.8}$) mais pour des trajectoires qui n'avaient pas les mêmes variations de position latérale (une trajectoire avec une position de départ en -15 cm et une position d'arrivée en -15 cm est une trajectoire avec un angle d'approche nul, sans variation de position latérale ; si la position d'arrivée est +15 cm, l'angle d'approche est maximal, les variations de position latérale équivalent à la distance latérale parcourue par le mobile divisée par la durée de la trajectoire). Les valeurs de $XB_{0.8}$ au cours du temps en terme d'attraction courante n'étaient pas les mêmes pour des trajectoires ayant le même point d'arrivée mais des angles d'approche différents. A la différence de la variable XB_1 qui est un attracteur constant et commun à ces trajectoires, la variable $XB_{0.8}$ permet de conserver les différences entre des trajectoires d'angle d'approche différent sans suggérer l'utilisation unique de XB_0 .

A ce stade de la démonstration, l'hypothèse du concept d'ordre intermédiaire s'inscrit dans celle du concept de combinaison. L'hypothèse du concept de combinaison de variables informationnelles a déjà été proposé dans la littérature (*e.g.*, Craig *et al.*, 2009) en suggérant la possibilité de l'influence conjointe d'une information d'ordre zéro et d'une information de premier ordre. Ce type d'hypothèse se traduirait pour les variables SAE à une combinaison entre la variable SAE XB_0 et la variable SAE XB_1 . De la même manière que la variable SAE XB_1 peut être obtenue par un développement en série de Taylor à partir de la variable SAE XB_0 ($XB_1 = XB_0 + (dX/dt) * TC_1$), nous avons calculé $XB_{0.8}$ par ce même type de développement, en apposant le coefficient 0.8 en facteur de la deuxième partie du terme permettant d'obtenir XB_1 ($XB_{0.8} = XB_0 + 0.8 * (dX/dt) * TC_1$). Pour le moment, nous ne pouvons pas prétexter que l'hypothèse de combinaison doit être écartée, même s'il lui est difficile d'expliquer certains résultats comme la probabilité d'observer des mouvements de rebroussement pour des trajectoires dont l'arrivée correspond à la position initiale de la main. L'hypothèse de combinaison suggère en effet que l'agent utiliserait à la fois XB_0 et XB_1 pour réussir l'interception d'un mobile. Mais alors pourquoi continuer d'utiliser XB_0 quand la seule utilisation de XB_1 permettrait d'éviter un mouvement superflu (le mouvement de rebroussement) ? Cette question de l'hypothèse de combinaison se posera à nouveau avec l'étude de l'interception locomotrice ; nous y reviendrons donc.

Le concept d'ordre intermédiaire s'est vu renforcé lorsqu'il nous a permis de donner du sens au temps d'initiation des mouvements d'interception et à la probabilité d'observer des mouvements de rebroussement. En calculant la valeur de $XB_{0.8}$ en terme de point attracteur courant sur l'axe de déplacement de la main des participants au moment de l'initiation de leur mouvement, nous avons observé que les valeurs moyennes relatives à chaque trajectoire définissaient une asymptote (*Eq. 5.2, Figure 5.6*). Cette asymptote représenterait un seuil de sensibilité moyenne expliquant le moment de l'initiation du mouvement. Ce seuil dépend, à l'instant t , du point attracteur courant défini par la variable SAE (la valeur de $XB_{0.8}(t)$) et du temps écoulé. La construction de cette asymptote nécessitait l'ajout d'une autre composante, t_m , un temps incompressible durant lequel les participants n'initiaient jamais leur mouvement. Déclenché lorsque la valeur de $XB_{0.8}$ dépassait celle de l'asymptote, le modèle simulait des temps d'initiation cohérents avec ceux observés expérimentalement. Ce concept de seuil de sensibilité, formalisé par une fonction asymptotique dépendante de la distance à parcourir et du temps écoulé, nous a permis d'expliquer pourquoi certaines trajectoires amenaient les participants à initier significativement plus tard leur mouvement. Les trajectoires partant en ± 15 cm (départs les plus extérieurs), croisant l'axe orthogonal à la position initiale de la main, et arrivant en ± 5 cm (arrivées les plus proches de la position initiale de la main), montraient des temps d'initiation tardifs. L'analyse des valeurs de $XB_{0.8}$ au cours du temps montrait qu'elles exprimaient des points attracteurs très proche du point 0, correspondant à la position initiale de la main. Il semble en effet compréhensible de ne pas initier un mouvement d'interception si la variable SAE qui guide le mouvement exprime une zone d'attraction correspondant à celle où la main se trouve. Les participants attendaient la caractérisation d'un point attracteur indiquant la nécessité d'initier le mouvement pour réussir l'interception. A l'inverse, pour des trajectoires à angle d'approche nul, partant en ± 15 cm et arrivant en ± 15 cm, la variable SAE suggérait très tôt qu'il fallait commencer à se déplacer pour espérer intercepter le mobile en approche. La variable $XB_{0.8}$ (qui pour le cas des trajectoires à angle d'approche nul équivaut au cours du temps à XB_0 et XB_1 , les variations de position latérale étant nulles) exprime dès le début de l'essai une zone d'attraction éloignée de la position initiale de la main, poussant les participants à initier précocement leur mouvement. Ce seuil de sensibilité moyenne a donc été construit selon une variable de distance et une autre temporelle et nous a ainsi permis d'expliquer l'influence des

caractéristiques d'une trajectoire sur le temps d'initiation moyen observé expérimentalement. Les participants montraient un temps d'initiation moyen directement fonction d'une distance à parcourir (connue à partir de la variable SAE d'ordre intermédiaire $XB_{0.8}$) selon le temps écoulé (connu à partir de la variable temporelle t). Cette interprétation du temps d'initiation est finalement proche de celle de Bootsma *et al.* (1997) et Jacobs et Michaels (2006) qui proposaient que le mouvement devait être initié quand la vitesse requise dépassait une certaine valeur critique.

C'est aussi grâce à cette idée de seuil de sensibilité que nous avons aussi pu expliquer la variabilité dans l'occurrence des mouvements de rebroussement pour les trajectoires arrivant en un point correspondant à la position initiale de la main. La fonction asymptotique évoquée précédemment caractérisait le seuil de sensibilité moyen. Mais les résultats montraient de la variabilité inter-essais quant aux temps d'initiation. En effet, un même participant n'initiait pas son mouvement exactement au même moment pour intercepter une balle empruntant une même trajectoire jouée dans deux sessions différentes (chaque participant devait réaliser des interceptions pour 112 conditions expérimentales différentes, randomisées dans trois sessions différentes). Nous avons analysé la distribution des temps d'initiation pour chaque condition expérimentale. Ont ainsi émergé neuf temps d'initiation caractéristiques par trajectoire pour une distribution de l'échantillon de participants en déciles. Ces temps d'initiation caractéristiques nous ont permis de définir, de la même façon que précédemment, 9 asymptotes (*Figure 5.8*). Ces asymptotes représentaient les différents niveaux de sensibilité qu'ont laissé apparaître les participants : une première asymptote pour un haut niveau de sensibilité préfigurant un essai où le participant se mettra rapidement en mouvement ; une neuvième asymptote pour un niveau de sensibilité moins élevé préfigurant un essai où le participant attendra un moment plus tardif pour initier son mouvement. Et de la même manière que précédemment, nous avons simulé notre modèle pour les quatre trajectoires arrivant au point correspondant à la position initiale de la main. Le comportement simulé se déclenchait lorsque la valeur de $XB_{0.8}$ dépassait celle d'une des asymptotes. Il s'est avéré que pour les trajectoires dont la position de départ était ± 15 cm, $XB_{0.8}$ franchissait la limite définie par les quatre premières asymptotes, représentant les niveaux de sensibilité les plus élevés, soit 40% des essais. Pour les trajectoires dont la position de départ était ± 5 cm, $XB_{0.8}$ franchissait la limite de

la première asymptote, caractérisant l'initiation moyenne de 10% des essais (*Figure 5.9*). Ces niveaux de sensibilité n'étant pas « participant-dépendant » mais « essai-dépendant », nous avons alors pu expliquer pourquoi lors de certains essais un participant opérait un mouvement de rebroussement, mais pour d'autres, pourtant identiques, non. Le modèle, déclenché sur la famille d'asymptotes, prédisait donc entre 40 et 50% de mouvement de rebroussement pour des trajectoires démarrant en ± 15 cm (points de départ les plus extérieurs), et entre 10 et 20% pour des trajectoires partant de ± 5 cm (points de départ les plus proches de la position initiale de la main). Ces taux de probabilité correspondent à ceux observés expérimentalement. $XB_{0.8}$ ne franchissait jamais les cinq dernières asymptotes, car si le seuil de sensibilité est trop bas, $XB_{0.8}$ finit par exprimer une zone d'attraction confondue avec celle de la main, et le participant demeure immobile et réussit l'interception.

Nous apportons ici une réponse à une question qui demeure dans la littérature quant à la possibilité d'observer ou non des mouvements de rebroussement pour des trajectoires rectilignes (Montagne *et al.*, 1999 ; Arzamarski *et al.*, 2007). Nous avons montré dans la deuxième étude expérimentale que ces rapports contradictoires pouvaient s'expliquer par la difficulté relative des conditions expérimentales. Une tâche de faible difficulté entraînera un niveau de sensibilité relativement bas chez les participants. Alors, lors de l'expérience, ces participants auront une tendance à initier leur mouvement de façon tardive car la tâche ne demande que très peu de prise de risque. Et nous venons de démontrer qu'un seuil de sensibilité bas peut réduire les probabilités d'observer des mouvements de rebroussement à un niveau nul.

Plus encore, le modèle simulait aussi le lien direct entre le moment d'initiation et l'amplitude du mouvement de rebroussement. En effet, lorsque $XB_{0.8}$ franchissait la limite définie par la première asymptote, sa valeur exprimait un point d'attraction plus distant de la position initiale de la main que le point d'attraction exprimé lorsque $XB_{0.8}$ franchissait la quatrième asymptote. Cette différence d'attraction serait responsable de la différence d'amplitude observée. Plus le mouvement est initié précocement, plus la variable SAE exprime une zone d'attraction distante de la position initiale de la main (une distance plus importante à couvrir), plus l'impulsion à opérer doit être importante, plus le point d'excursion maximale sera alors excentré par rapport à la position initiale, et donc plus l'amplitude du mouvement de rebroussement sera importante.

Finalement cette étude nous a apporté trois arguments forts en faveur du concept de variable SAE d'ordre intermédiaire : une explication de l'effet systématique de l'angle d'approche, une explication de l'effet de la trajectoire sur le moment d'initiation du mouvement et une explication des probabilités d'observation de mouvement de rebroussement ainsi que de l'influence du moment d'initiation sur l'amplitude de ces rebroussements.

7.2. Interception latérale locomotrice

7.2.1. Rappel des principaux résultats

La troisième et dernière étude expérimentale de ce travail (cf. Chapitre 6) était l'étude d'une tâche d'interception locomotrice où les participants incarnaient un gardien de but immergé dans un environnement virtuel (stade et mobile virtuels aux dimensions réglementaires). Ils devaient se déplacer latéralement sur la ligne du but (déplacement du point d'observation) et intercepter des mobiles empruntant des trajectoires rectilignes et curvilignes se développant dans le plan transverse. Nous avons observé un effet systématique de l'angle d'approche. En effet, des trajectoires rectilignes (sans courbures) différentes mais franchissant l'axe de déplacement des participants au même endroit montraient une influence du départ de la balle sur le patron cinématique moyen des participants (voir *Figure 6.2*). Cet effet d'angle d'approche était accompagné par des différences au niveau du temps d'initiation du mouvement. Comme rapporté avec la deuxième étude expérimentale, une trajectoire qui croisait le plan sagittal au point d'observation initial des participants et franchissait leur axe de déplacement à un point proximal (± 0.6 m) amenait ceux-ci à initier significativement plus tard leur mouvement (voir *Figure 6.2*). L'analyse des conditions expérimentales pour lesquelles les trajectoires étaient curvilignes (avec accélération latérale) a montré que les participants opéraient des mouvements de rebroussement (pour 12 de ces 16 conditions). Nous rappelons qu'un mouvement de rebroussement se caractérise par un changement de direction pendant le mouvement d'interception. Précisément, pour 8 de ces 12 conditions, le premier mouvement était effectivement opéré dans la direction opposée

au futur point d'arrivée de la balle, tandis que pour 4 conditions, le rebroussement était caractérisé par un dépassement du futur point d'arrivée du mobile, nécessitant un changement de direction en fin d'essai pour réussir l'interception. Et plus spécifiquement, si les participants initiaient tôt leur mouvement, des rebroussements étaient observés, s'ils initiaient tard, non (voir *Figure 6.3-4*). Pour chacune des 8 trajectoires montrant des mouvements initiaux dans la mauvaise direction, deux groupes d'essais pouvaient être différenciés : un premier groupe montrait la réalisation de mouvements de rebroussement et des temps d'initiation plus précoces, un deuxième groupe ne laissait pas apparaître de tels mouvements et les initiations étaient plus tardives, le premier mouvement était dans la bonne direction (voir *Figure 6.3-4*).

Enfin, au moment d'excursion maximale moyen d'un mouvement de rebroussement pour une trajectoire précise, c'est-à-dire le moment où les participants amorçaient la deuxième partie du mouvement dans la direction opposée, ni l'information $d^0\theta/dt^0$, ni $d^1\theta/dt^1$ ne pouvaient expliquer ce changement de direction. Seule l'annulation de la variable optique $d^2\theta/dt^2$ pouvait être responsable des patrons cinématiques locomoteurs observés. Pour les essais qui ne montraient pas de mouvement de rebroussement, au moment de l'initiation, seule l'information $d^2\theta/dt^2$ pouvait expliquer un premier déplacement dans la bonne direction (l'annulation de $d^0\theta/dt^0$ ou $d^1\theta/dt^1$ aurait laissé émerger des mouvements de rebroussement, voir *Figure 6.3-4*).

7.2.2. Discussion

Les participants, immergés dans un environnement virtuel, devaient se déplacer latéralement pour intercepter le mobile en approche. Il s'agissait d'une tâche d'interception locomotrice, ce qui implique le déplacement du point d'observation. De la même manière que pour le mouvement d'interception manuelle, la réussite de la tâche implique l'annulation de la distance entre la variable SAE pertinente (XB_0 , XB_1 ou XB_α) et ici le point d'observation de l'agent. Le déplacement de l'agent impliquant celui de son point d'observation, pour réussir une interception locomotrice il faut annuler la variable SAE pertinente. Nous avons montré que cette variable SAE pertinente était spécifiée par une variable optique. Dans un plan transverse, XB_0 est spécifiée par la variable optique $cal.*\theta/\varphi$ et XB_1 par $cal.*(d\theta/dt)/(d\varphi/dt)$. Ainsi, pour réussir une interception

locomotrice il suffit d'annuler θ (ou $d^0\theta/dt^0$) si la variable SAE pertinente est XB_0 ; d'annuler $d\theta/dt$ (ou $d^1\theta/dt^1$) si XB_1 est la variable pertinente ; ou enfin d'annuler $d^\alpha\theta/dt^\alpha$ si la variable XB_α est responsable des régulations du mouvement d'interception. Pour une tâche d'interception locomotrice, la réussite de l'interception consiste donc à annuler la variable optique pertinente afin d'être au bon endroit au bon moment. Dans cette logique, nous avons simulé un modèle dynamique incluant successivement l'information d'ordre zéro $d^0\theta/dt^0$; l'information de premier ordre $d^1\theta/dt^1$; et l'information de second ordre $d^2\theta/dt^2$. Un modèle intégrant $d^0\theta/dt^0$ simulé pour des trajectoires rectilignes partant de ± 4 m produira des patrons cinématiques montrant des mouvements de rebroussement. Nous n'avons pas observé de tels comportements pour les trajectoires rectilignes ; il ne pouvait donc pas s'agir de la variable informationnelle responsable des régulations du mouvement. La simulation avec l'information $d^1\theta/dt^1$ ne montrait pas d'effet d'angle d'approche que nous avons pourtant observé pour des trajectoires différentes mais arrivant au même endroit (*Figure 6.2*). Enfin la simulation avec $d^2\theta/dt^2$ ne montraient aucun mouvement de rebroussement pour les 16 trajectoires curvilignes jouées lors de l'expérience. Les résultats montraient pourtant un très grand nombre de rebroussements pour 12 de ces 16 trajectoires (*Figure 6.2*). Ces variables d'ordre entier montraient donc explicitement leurs limites quant à leur capacité explicative des phénomènes d'interaction agent-environnement engagés lors d'une interception locomotrice. La littérature ne considère pourtant que celles-ci.

Nous avons alors analysé comment se comportait le modèle si nous y appliquions l'idée d'ordre intermédiaire, que nous avons alors redéfini avec le concept mathématique d'information d'ordre fractionnaire. Le fait de raisonner à partir de variables optiques nous permettait alors d'utiliser celui d'information. Mais il nous fallait dépasser les limites de la deuxième étude expérimentale, quant au choix de l'ordre fractionnaire de l'information. Il semblait impératif, si ordre fractionnaire il y avait, que celui-ci ait un sens plus clair. L'utilisation d'une information d'ordre fractionnaire requiert la détection de variation de position. S'il n'y a pas de variation de position, le concept d'ordre fractionnaire se résume à celui d'ordre zéro. En début d'essai, les participants percevaient la position initiale de la balle pendant une seconde. Pendant cette première seconde, la balle virtuelle était immobile donc l'agent ne pouvait pas détecter de variations de position. Puis la balle développait sa trajectoire : rectiligne ou

curviligne. Deux hypothèses étaient alors possibles : fixer un ordre fractionnaire défini arbitrairement par optimisation, ou développer le concept de progression en ordre. Cette deuxième hypothèse proposait un potentiel philosophique stimulant ; nous avons donc choisi de construire une réflexion sur cette base-là. Si la balle est immobile, il n'y a pas de variation, l'information disponible ne peut être autre que $d^0\theta/dt^0$. Lorsque cette balle se met en mouvement, il y a perception des variations du mobile pour balayer le continuum d'ordres fractionnaires possibles. S'est alors posé la question des caractéristiques de cette montée en ordre. Pour ne pas multiplier les paramètres du modèle, nous avons opté pour la solution la plus simple, une progression en ordre linéaire. Ainsi, pour chaque trajectoire, l'ordre fractionnaire α était déterminé à chaque instant t en partant de la valeur zéro et augmentait linéairement jusqu'à ce que l'information $d^\alpha\theta/dt^\alpha$ passe en dessous d'une valeur significative.

Cette valeur significative était définie à chaque instant par la taille optique de la balle virtuelle (φ) et un temps critique ($t_c = 0.23$) élevé à la puissance α (t_c^α , composante du modèle permettant son homogénéisation). Le modèle simulait l'initiation du mouvement sur le principe de seuil de sensibilité des participants formalisé avec une asymptote, concept développé précédemment avec la deuxième étude expérimentale. Sur la base de ce fonctionnement, le modèle simulé sur les trajectoires rectilignes produisait des patrons cinématiques qui montraient l'effet de l'angle d'approche en faisant progresser α jusqu'à une valeur finale inférieure à 1 (0.92 ou 0.97 selon les trajectoires).

Mais le système visuel humain semble pouvoir utiliser une information d'un ordre supérieur à 1. C'est en tout cas la seule façon d'expliquer les rebroussements précoces observés pour 8 des 16 trajectoires curvilignes (voir *Figure 6.3-4*). En effet, pour ces 8 trajectoires, lors du moment de changement de direction, $d^0\theta/dt^0$ et $d^1\theta/dt^1$ spécifiaient aux participants de poursuivre leur mouvement en continuant de s'excentrer. Or ceux-ci opéraient déjà un mouvement dans la direction opposée : soit ce comportement était guidé par l'information $d^2\theta/dt^2$, soit par $d^\alpha\theta/dt^\alpha$ pour un α compris entre 1 et 2. La simulation du modèle exprimait un α compris entre 1.6 et 1.9 et produisait les patrons cinématiques observés expérimentalement.

Ajouté au concept de progression en ordre et à celui de critère autodéterminant α , le concept d'information intermédiaire permettait d'expliquer les comportements caractéristiques des tâches d'interception : effet d'angle d'approche, timing et amplitude des mouvement de rebroussement, temps d'initiation. Cette étude montrait un peu plus

l'intérêt de considérer que le système visuel pourrait être sensible à des variables informationnelles d'ordre intermédiaire.

Cependant, ici aussi se pose la limite de l'hypothèse de combinaison. L'ordre fractionnaire autodéterminé pour chaque trajectoire pourrait refléter la combinaison d'une information d'ordre zéro et une information de premier ordre pour l'interception de trajectoires rectilignes ($0 < \alpha < 1$) ; ou même une combinaison faisant intervenir une information de second ordre pour l'interception de trajectoires curvilignes ($1 < \alpha < 2$). Mais là encore, comme nous l'avons exprimé dans la discussion relative à la deuxième étude expérimentale, il semble difficile de concevoir qu'un agent utilisant une information de second ordre, l'amenant à réguler son mouvement en direction du futur point d'interception pour une trajectoire curviligne, opère quasi systématiquement des mouvements de rebroussement superflus. La logique voudrait qu'il n'opère pas ce premier mouvement dans la mauvaise direction mais qu'il se dirige directement vers le futur point d'arrivée du mobile.

Le modèle dynamique FOP (*Fractional-Order-Progression*) développe l'idée que les régulations du mouvement d'interception se feraient sur la base de l'annulation de l'information $d^\alpha \theta / dt^\alpha$ (Figure 6.1). Nous proposons avec ce modèle une formalisation efficace et écologique des relations information-mouvement mises en œuvre lors de l'interception d'un mobile.

Finalement, la troisième étude expérimentale a permis plusieurs avancées conceptuelles. Tout d'abord elle a offert un regard nouveau sur les deux pans de littérature relative au mouvement d'interception (locomotrice et manuelle) en montrant qu'ils pouvaient être appréhendés dans une seule et même perspective. Ensuite, elle a permis la formalisation d'un modèle construit directement autour variable informationnelle qui guiderait le mouvement d'interception, et non pas autour d'une variable SAE. Enfin, elle a confirmé l'intérêt conceptuel de considérer l'influence potentielle d'une information d'ordre intermédiaire et a même laissé entrevoir que cette information pourrait progresser en ordre, devenant de plus en plus riche pour l'agent et se stabiliserait à un ordre intermédiaire précis, dépendant de la situation environnementale.

7.3. Synthèse

L'objectif de ce travail était d'apporter des éléments de réponse à la problématique en double hypothèse se dégageant de l'étude du mouvement d'interception : (i) quelle est l'information visuelle responsable du contrôle continu de l'action ? (ii) comment est utilisée cette information par l'agent ? Nous avons positionné ce travail quant à cette double hypothèse par la modélisation des interactions agent-environnement observables expérimentalement. Nous avons proposé avec les deuxièmes et troisièmes études (chapitres 5 et 6) deux modèles capable de simuler les comportements cinématiques effectivement observés. Il s'agit de modèles construits sur l'idée de l'utilisation par le système visuelle de variables d'ordres intermédiaires. Nous avons proposé que pour intercepter manuellement un objet en approche dans un plan fronto-parallèle (point d'observation fixe), une variable SAE d'ordre intermédiaire (XB_α) par opposition aux variables SAE d'ordres entiers (XB_0 , XB_1 , XB_2 etc.) pourrait être responsable des régulations observées expérimentalement. Pour le cas de l'interception locomotrice avec mouvement du mobile dans le plan transverse, nous avons appliqué ce concept d'ordre intermédiaire, que nous avons décliné en concept d'information d'ordre fractionnaire. Cet ordre fractionnaire dépendrait des caractéristiques de la trajectoire de la balle à intercepter. Pour une trajectoire rectiligne, sans accélération latérale, l'ordre fractionnaire α sera compris entre 0 et 1. Pour une trajectoire curviligne, donc avec accélération latérale, il pourra être compris entre 1 et 2. Considérer l'utilisation d'information d'ordres intermédiaires aux ordres entiers a ouvert la possibilité d'offrir un cadre cohérent pour l'explication des différents comportements observables lors de l'exécution d'actions d'interception. En premier lieu, le moment de l'initiation du mouvement, le premier comportement observable. S'il est difficile de comprendre ce qu'il se passe d'un point de vue perceptif avant ce moment d'initiation, celui-ci est en tout cas un évènement fort directement lié à un état particulier du système agent-environnement. Considérer que l'information disponible pouvait prendre des états fractionnaires nous a permis de mettre en évidence des phénomènes récurrents aux différentes études expérimentales. Certains types de trajectoires entraînaient systématiquement des initiations tardives, quand d'autres poussaient les participants à agir précocement. Cette observation nous a amené à proposer l'idée d'un seuil de

sensibilité développé et formalisé avec une fonction asymptotique directement dépendante du temps (temps écoulé) et de l'espace (distance à parcourir pour annuler la variable pertinente). Nous avons aussi pu expliquer l'effet d'angle d'approche, effet rapporté par de nombreuses études sur le mouvement d'interception effectué dans le plan transverse ou fronto-parallèle (Montagne *et al.*, 1999 ; Arzamarski *et al.*, 2007 ; Ledouit *et al.*, 2013), mais qui n'a jamais fait l'objet d'un consensus quant à son interprétation. Nous avons aussi apporté une réponse au débat sur la possibilité d'observer, ou non, des mouvements de rebroussement lors de l'interception de mobiles approchant selon des trajectoires rectilignes. Il s'agissait d'une question importante dans la littérature sur l'interception car il est rare que des études se contredisent autant en termes de résultats. Montagne *et al.* (1999) rapportaient en avoir observé dans des proportions significatives quand Arzamarski *et al.* (2007) affirmaient que ce type de mouvement ne pouvait être observé qu'en proportion négligeable pour des trajectoires rectilignes. Selon nous ces probabilités seraient directement fonction des seuils de sensibilité des participants. Ainsi, pour augmenter les probabilités d'observer des rebroussements, il faut réussir à faire augmenter ce seuil de sensibilité en augmentant la difficulté de la tâche. Les mouvements de rebroussement pour des trajectoires rectilignes (caractérisés par un mouvement d'excursion suivi d'un retour vers la position initiale) ont constitué un argument important en faveur du développement du concept d'ordre intermédiaire de l'information. Et c'est aussi l'étude de ces mouvements particuliers de rebroussement, mais pour des trajectoires curvilignes (caractérisés par un changement de direction pendant le mouvement), ne souffrant pas de contestations dans la littérature, qui nous a permis de montrer qu'une information d'un ordre supérieur à 1 pouvait être utilisée pour le contrôle continu de l'action d'interception. Ceci n'avait jamais été proposé précédemment. En grande partie parce que de nombreuses études avaient montré que le système visuel humain était incapable de percevoir l'accélération d'un objet (Brouwer *et al.*, 2002; Calderone et Kaiser, 1989; Werkhoven *et al.*, 1992; Zaal *et al.*, 2012), et que le concept d'ordre intermédiaire n'avait encore jamais été considéré en sciences du mouvement humain. C'est d'ailleurs l'analyse de ces mouvements de rebroussement pour des trajectoires curvilignes qui nous a amené à suggérer que l'information pourrait prendre des états intermédiaires aux ordres entiers. Le deuxième mouvement, le rebroussement, en direction de la position d'arrivée du mobile, ne pouvait pas s'expliquer par une information de premier ordre

$(d^1\theta/dt^1)$ dont l'annulation impliquait de poursuivre le premier mouvement d'excentration. Mais il ne pouvait pas s'expliquer non plus par une information de deuxième ordre $(d^2\theta/dt^2)$, dont l'annulation nécessitait d'opérer un premier mouvement directement en direction du futur point d'arrivée du mobile : son utilisation n'aurait donc pas pu laisser émerger de mouvement de rebroussement. Il ne restait donc qu'une solution, l'utilisation d'une information d'ordre fractionnaire $(d^\alpha\theta/dt^\alpha)$. Il semblerait, que tous les modèles dynamiques formalisant les relations information-mouvement pourraient dépasser de nombreuses limites s'ils commençaient à considérer l'éventualité que les organismes vivants qu'ils étudient sont sensibles à des variables informationnelles d'ordres fractionnaires plutôt qu'entiers.

Finalement cette thèse est principalement construite autour de cette idée nouvelle de l'utilisation d'une information d'ordre fractionnaire. Ce concept est central car nous pensons en apporter les premiers éléments de preuve avec des observations expérimentales, ainsi qu'avec la proposition d'un modèle dynamique capable de prédire ces observations, conditions nécessaires au développement de toute avancée scientifique. Mais un autre concept y a été apposé, tout aussi nouveau, et peut-être plus fort encore, l'idée d'une information qui progresserait en ordre. Une information qui deviendrait de plus en plus riche même à l'échelle temporelle de la seconde. C'est ce concept qu'il faut maintenant développer pour continuer le chemin conceptuel ouvert par ces travaux.

Conclusion

Dans de ce travail nous avons étudié le mouvement d'interception latéral en réalité virtuelle. Nous avons réalisé trois études expérimentales pour comprendre les stratégies perceptivo-motrices mises en œuvre pour réussir une tâche d'interception. Deux d'entre elles étudiaient l'action d'interception manuelle, une l'action d'interception locomotrice. Pour ces deux modalités de l'action, une problématique recouvrant deux questions s'est dégagée : Quelle information visuelle guide le contrôle continu du mouvement ? Comment est-elle utilisée ? Double hypothèse contenue dans le travail de modélisation des interactions agent-environnement engagées dans le contrôle continu du mouvement d'interception. La thèse que nous avons défendue est que l'information visuelle qui guide le comportement serait une information d'ordre fractionnaire (et non entier) qui augmenterait au cours du temps, pour se stabiliser et exprimer l'instauration d'une relation fiable et continue entre l'agent et l'environnement. Cette information pourrait donc prendre une infinité d'ordres fractionnaires directement fonction de la situation environnementale. Ce concept d'information d'ordre fractionnaire qui augmenterait jusqu'à une certaine valeur nous a permis d'expliquer avec cohérence les patrons cinématiques caractéristiques des mouvements d'interception : effet de l'angle d'approche ; temps d'initiation ; probabilité, timing et amplitude des mouvements de rebroussement. Nous avons proposé deux modèles dynamiques : un premier, formalisant l'interception latérale manuelle, basé sur le concept de vitesse requise où il faut annuler la distance entre la main et la variable $SAE XB_\alpha$; un deuxième modèle, pour l'interception locomotrice, basé sur l'annulation de l'information $d^\alpha \theta / dt^\alpha$ augmentant en ordre. La simulation de ces modèles a montré l'émergence de patrons cinématiques similaires à ceux observés expérimentalement. Ceci nous a permis de valider nos hypothèses quant aux deux questions que nous avons posées.

Bibliographie

- Anastasio, T. J. (1994). The fractional-order dynamics of brainstem vestibulo-oculomotor neurons. *Biological Cybernetics*, 72(1), 69–79.
- Anastasio, T. J. (1998). Nonuniformity in the linear network model of the oculomotor integrator produces approximately fractional-order dynamics and more realistic neuron behavior. *Biological Cybernetics*, 79(5), 377–391.
- Anastasio, T. J., & Correia, M. J. (1994). “Velocity leakage” in the pigeon vestibuloocular reflex. *Biological Cybernetics*, 70(3), 235–245.
- Arzamarski, R., Harrison, S. J., Hajnal, A., & Michaels, C. F. (2007). Lateral ball interception: hand movements during linear ball trajectories. *Experimental Brain Research*, 177(3), 312–323.
- Babler, T. G., & Dannemiller, J. L. (1993). Role of image acceleration in judging landing location of free-falling projectiles. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 19(1), 15–31.
- Bastin, J., Craig, C., & Montagne, G. (2006). Prospective strategies underlie the control of interceptive actions. *Human Movement Science*, 25(6), 718–732.
- Bastin, J., Jacobs, D. M., Morice, A. H. P., Craig, C., & Montagne, G. (2008). Testing the role of expansion in the prospective control of locomotion. *Experimental Brain Research*, 191(3), 301–312.
- Bastin, J., Fajen, B. R., & Montagne, G. (2010). Controlling speed and direction during interception: an affordance-based approach. *Experimental Brain Research*, 201(4), 763–780.
- Beek, P. J., Dessing, J. C., Peper, C. E., & Bullock, D. (2003). Modelling the control of interceptive actions. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1437), 1511–1523.
- Beek, P. J., Peper, C. E., Daffertshofer, A., van Soest, A. J., & Meijer, O. G. (1998). Studying perceptual-motor actions from mutually constraining perspectives. In A. A. Post, J. R. Pijpers, P. Bosch, & M. S. J. Boschker (Eds.), *Models in Human Movement Science* (pp. 93–111). Enschede: PrintPartners Ipskamp.

- Boeddeker, N., Kern, R., & Egelhaaf, M. (2003). Chasing a dummy target: smooth pursuit and velocity control in male blowflies. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 270(1513), 393–399.
- Bootsma, R. J., & van Wieringen, P. C. W. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 16(1), 21–29.
- Bootsma, R. J. (1991). Predictive information and the control of action: What you see is what you get. *International Journal of Sport Psychology* 22, 271–278.
- Bootsma, R. J., & Oudejans, R. R. (1993). Visual information about time-to-collision between two objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19(5), 1041.
- Bootsma, R. J., Fayt, V., Zaal, F. T. J. M., & Laurent, M. (1997). On the information-based regulation of movement: What Wann (1996) may want to consider. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 23(4), 1282–1289.
- Bootsma, R. J. (1998). Ecological movement principles and how much information matters. In A.A. Post, J.R. Pijpers, P. Bosch, & M.S.J. Boschker (Eds), *Models in Human Movement Science: Proceedings of the Second Symposium of the Institute for Fundamental and Clinical Human Movement Sciences*, (pp. 51-63). Enschede: PrintPartners Ipskamp.
- Bootsma, R. J., & Craig, C. M. (2002). Global and local contributions to the optical specification of time to contact: Observer sensitivity to composite tau. *PERCEPTION-LONDON*, 31(8), 901-924.
- Bootsma, R. J. (2009). The (current) future is here! *Perception*, 38(6), 851.
- Bootsma, R. J., Fernandez, L., Morice, A. H. P., & Montagne, G. (2010). Top-level players' visual control of interceptive actions: Bootsma and van Wieringen (1990) 20 years later. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 36(4), 1056–1063.
- Bootsma, R. J., Ledouit, S., Casanova, R., Zaal F. T. J. M. (2015). Fractional-Order Information in the Visual Control of Lateral Locomotor Interception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*. doi:10.1037/xhp.0000162

- Brenner, E., Smeets J. B. J., & de Lussanet M. H. E. (1998). Hitting moving targets. Continuous control of the acceleration of the hand on the basis of the target's velocity. *Experimental Brain Research*, 122(4), 467–474.
- Brouwer, A.-M., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2002). Perception of acceleration with short presentation times: Can acceleration be used in interception? *Perception & Psychophysics*, 64(7), 1160–1168.
- Brouwer, A.-M., Smeets, J. B. J., & Brenner, E. (2005). Hitting moving targets: effects of target speed and dimensions on movement time. *Experimental Brain Research*, 165(1), 28–36.
- Bullock, D., & Grossberg, S. (1988a). Neural dynamics of planned arm movements: Emergent invariants and speed–accuracy properties during trajectory formation. *Psychological Review*, 95(1), 49–90.
- Bullock, D., & Grossberg, S. (1988b). The VITE model: A neural command circuit for generating arm and articulator trajectories. In J.A.S. Kelso, A.J. Mandell, & M.F. Shlesinger (Eds.), *Dynamic patterns in complex system*, (pp. 305–326). Singapore: World Scientific Publishers.
- Bullock, D., & Grossberg, S. (1991). Adaptive neural net works for control of movement trajectories invariant under speed and force rescaling. *Human Movement Science*, 10(1), 3–53.
- Calderone, J. B., & Kaiser, M. K. (1989). Visual acceleration detection: Effect of sign and motion orientation. *Perception & Psychophysics*, 45(5), 391–394.
- Casanova, R., Borg, O., & Bootsma, R. J. (2015). Perception of spin and the interception of curved football trajectories. *Journal of Sports Sciences*, 33(17), 1822–1830.
- Chapman, S. (1968). Catching a baseball. *American Journal of Physics*, 36(10), 868–870.
- Chardenon, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002). The visual control of ball interception during human locomotion. *Neuroscience Letters*, 334(1), 13–16.
- Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M., & Bootsma, R. J. (2004). The perceptual control of goal-directed locomotion: a common control architecture for interception and navigation? *Experimental Brain Research*, 158(1), 100–108.
- Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M., & Bootsma, R. J. (2005). A robust solution for dealing with environmental changes in intercepting moving balls. *Journal of Motor Behavior*, 37(1), 52–64.

- Chohan, A., Savelsbergh, G. J. P., van Kampen, P., Wind, M., & Verheul, M. H. G. (2006). Postural adjustments and bearing angle use in interceptive actions. *Experimental Brain Research*, 171(1), 47–55.
- Chohan, A., Verheul, M. H. G., Van Kampen, P. M., Wind, M., & Savelsbergh, G. J. P. (2008). Children's use of the bearing angle in interceptive actions. *Journal of Motor Behavior*, 40(1), 18–28.
- Collett, T. S., & Land, M. F. (1978). How hoverflies compute interception courses. *Journal of Comparative Physiology A*, 125(3), 191–204.
- Craig, C. M., Bastin, J., & Montagne, G. (2011). How information guides movement: Intercepting curved free kicks in soccer. *Human Movement Science*, 30(5), 931–941.
- Craig, C. M., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L., & Bootsma, R. J. (2006). Judging where a ball will go: the case of curved free kicks in football. *Naturwissenschaften*, 93(2), 97–101.
- Craig, C. M., Goulon, C., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L., & Bootsma, R. J. (2009). Optic variables used to judge future ball arrival position in expert and novice soccer players. *Attention Perception & Psychophysics*, 71(3), 515–522.
- Craik, K. J. W. (1943). *The Nature of Explanation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dalir, M., & Bashour, M. (2010). Applications of fractional calculus. *Applied Mathematical Sciences*, 4(21), 1021–1032.
- Dessing, J. C., Bullock, D., Peper, C. E., & Beek, P. J. (2002). Prospective control of manual interceptive actions: comparative simulations of extant and new model constructs. *Neural Networks*, 15(2), 163–179.
- Dessing, J. C., Beek, P. J., Caljouw, S. R., & Peper, C. L. E. (2004). A dynamical neural network for hitting an approaching object. *Biological Cybernetics*, 91(6), 377–387.
- Dessing, J. C., Peper, C. E., Bullock, D., & Beek, P. J. (2005). How position, velocity, and temporal information combine in the prospective control of catching: Data and model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 17(4), 668–686.
- Dessing, J. C., Oostwoud Wijdenes, L., Peper, C. E., & Beek, P. J. (2009). Visuomotor transformation for interception: catching while fixating. *Experimental Brain Research*, 196(4), 511–527.
- Dessing, J. C., & Craig, C. M. (2010). Bending it like Beckham: How to visually fool the goalkeeper. *PLoS ONE*, 5(10), e13161.

- Duchon, A. et Warren, W. (1994). Robot navigation from a gibsonian viewpoint. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (vol. 3, pp. 2272-2277). San Antonio, TX: IEEE Press.
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29(2), 343–362.
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2004). Visual guidance of intercepting a moving target on foot. *Perception*, 33(6), 689–715.
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2007). Behavioral dynamics of intercepting a moving target. *Experimental Brain Research*, 180(2), 303–319.
- Fayt, V., Bootsma, R. J., Marteniuk, R. G., MacKenzie, C. L., & Laurent, M. (1997). The effects of task constraints on the organization of interception movements. *Journal of Sports Sciences*, 15(6), 581–586.
- Fink, P. W., Foo, P. S., & Warren, W. H. (2009). Catching fly balls in virtual reality: A critical test of the outfielder problem. *Journal of Vision*, 9(13). doi:10.1167/9.13.14
- Fodor, J. A. (1983). *The modularity of mind: An essay on faculty psychology*. MIT press.
- Ghose, K., Horiuchi, T. K., Krishnaprasad, P. S., & Moss, C. F. (2006). Echolocating bats use a nearly time-optimal strategy to intercept prey. *PLoS Biology*, 4(5), e108.
- Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. *Perceiving, acting, and knowing : Toward an ecological psychology*. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- Gibson, J. J. (1986). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Erlbaum, Hillsdale, NJ.
- Gilbert, C. (1997). Visual control of cursorial prey pursuit by tiger beetles (Cicindelidae). *Journal of Comparative Physiology A*, 181(3), 217–230.
- Gray, R. (2009). A model of motor inhibition for a complex skill: Baseball batting. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 15(2), 91–105.
- Gries, M., & Koeniger, N. (1996). Straight forward to the queen: pursuing honeybee drones (*Apis mellifera* L.) adjust their body axis to the direction of the queen. *Journal of Comparative Physiology A*, 179(4), 539–544.
- Haselsteiner, A. F., Gilbert, C., & Wang, Z. J. (2014). Tiger beetles pursue prey using a proportional control law with a delay of one half-stride. *Journal of the Royal Society, Interface*, 11(95), 20140216.

- Jacobs, D. M., & Michaels, C. F. (2006). Lateral interception I: operative optical variables, attunement, and calibration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(2), 443–458.
- Jacobs, D. M., Vaz, D. V., & Michaels, C. F. (2012). The learning of visually guided action: an information-space analysis of pole balancing. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 38(5), 1215–1227.
- Johansson, G. (1973). Visual perception of biological motion and a model for its analysis. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 14(2), 201-211.
- Kane, S. A., & Zamani, M. (2014). Falcons pursue prey using visual motion cues: new perspectives from animal-borne cameras. *The Journal of Experimental Biology*, 217(2), 225–234.
- Kane, S. A., Fulton, A. H., & Rosenthal, L. J. (2015). When hawks attack: animal-borne video studies of goshawk pursuit and prey-evasion strategies. *The Journal of Experimental Biology*, 218(2), 212–222.
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections. In C. Freksa, C. Habel, and K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition - An Interdisciplinary Approach to Representation and Processing of Spatial Knowledge* (pp. 1–17). Berlin: Springer.
- Lanchester, B. S., & Mark, R. F. (1975). Pursuit and prediction in the tracking of moving food by a teleost fish (*Acanthaluteres spilomelanurus*). *The Journal of Experimental Biology*, 63(3), 627–645.
- Land, M. F., & Collett, T. S. (1974). Chasing behaviour of houseflies (*Fannia canicularis*). *Journal of Comparative Physiology A*, 89(4), 331–357.
- Ledouit, S., Casanova, R., Zaal, F. T. J. M., & Bootsma, R. J. (2013). Prospective control in catching: The persistent angle-of-approach effect in lateral interception. *PLoS ONE*, 8(11), e80827.
- Lee, D. N. (1974). Visual information during locomotion. In R. B. McLeod & H. L. Pick (Eds.), *Studies in perception: Essays in honor of J. J. Gibson* (pp. 250–267). Ithaca: Cornell University Press..
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception*, 5(4), 437-459.
- Lee, D.N. (1980). Visuo-motor coordination in space-time. In G. E. Stelmach, & J. Requin (Eds.), *Tutorials in motor behavior* (pp. 281-293). Amsterdam: North-Holland.

- Lenoir, M., Musch, E., Savelsbergh, G. J. P., Thiery, E., Uyttenhove, J., & Janssens, M. (1999). Intercepting moving objects during self-motion: effects of environmental changes. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 70(4), 349–360.
- Lenoir, M., Musch, E., Thiery, E., & Savelsbergh, G. J. P. (2002). Rate of change of angular bearing as the relevant property in a horizontal interception task during locomotion. *Journal of Motor Behavior*, 34(4), 385–404.
- Lenoir, M., Vansteenkiste, J., Vermeulen, J., & De Clercq, D. (2005). Effects of contrasting colour patterns of the ball in the volleyball reception. *Journal of Sports Sciences*, 23(8), 871–879.
- Lundstrom, B. N., Higgs, M. H., Spain, W. J., & Fairhall, A. L. (2008). Fractional differentiation by neocortical pyramidal neurons. *Nature Neuroscience*, 11(11), 1335–1342.
- McBeath, M. K., Shaffer, D. M., & Kaiser, M. K. (1995). How baseball outfielders determine where to run to catch fly balls. *Science*, 268(5210), 569–573.
- McLeod, P., & Dienes, Z. (1996). Do fielders know where to go to catch the ball or only how to get there? *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 22(3), 531–543.
- McLeod, P., Reed, N., & Dienes, Z. (2003). How fielders arrive in time to catch the ball. *Nature*, 426(6964), 244–245.
- McLeod, P., Reed, N., & Dienes, Z. (2006). The generalized optic acceleration cancellation theory of catching. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 32(1), 139–148.
- Michaels, C. F., & Carello, C. (1981). *Direct perception* (pp. 1-208). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Michaels, C. F., & Oudejans, R. R. D. (1992). The optics and actions of catching fly balls: Zeroing out optical acceleration. *Ecological Psychology*, 4(4), 199–222.
- Michaels, C. F., Zeinstra, E., & Oudejans, R. R. D. (2001). Information and action in timing the punch of a falling ball. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 54(1), 69–93.
- Michaels, C. F., Jacobs, D. M., & Bongers, R. M. (2006). Lateral interception II: predicting hand movements. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 32(2), 459–472.

- Montagne, G., Laurent, M., Durey, A., & Bootsma, R. J. (1999). Movement reversals in ball catching. *Experimental Brain Research*, 129(1), 87–92.
- Montagne, G., Fraisse, F., Ripoll, H., & Laurent, M. (2000). Perception-action coupling in an interceptive task: First-order time-to-contact as an input variable. *Human Movement Science*, 19(1), 59–72.
- Morice, A. H. P., François, M., Jacobs, D. M., & Montagne, G. (2010). Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Experimental Brain Research*, 202(2), 397–411.
- Neisser, U. (1967). *Cognitive psychology*. Prentice Hall, New York, NY.
- Olberg, R. M., Worthington, A. H., & Venator, K. R. (2000). Prey pursuit and interception in dragonflies. *Journal of Comparative Physiology A*, 186(2), 155–162.
- Olberg, R. M. (2012). Visual control of prey-capture flight in dragonflies. *Current Opinion in Neurobiology*, 22(2), 267–271.
- Peper, L., Bootsma, R. J., Mestre, D. R., & Bakker, F. C. (1994). Catching balls: how to get the hand to the right place at the right time. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 20(3), 591–612.
- Podlubny, I. (1999). *Fractional differential equations: an introduction to fractional derivatives, fractional differential equations, to methods of their solution and some of their applications*. San Diego: Academic press.
- Podlubny, I. (2002). Geometric and physical interpretation of fractional integration and fractional differentiation. *Fractional Calculus & Applied Analysis*, 5(4), 367–386.
- Regan, D., & Kaushal, S. (1994). Monocular discrimination of the direction of motion in depth. *Vision Research*, 34(2), 163–177.
- Runeson, S. (1974). Constant velocity—not perceived as such. *Psychological Research*, 37(1), 3–23.
- Schmerler, J. (1976). The visual perception of accelerated motion. *Perception*, 5(2), 167–185.
- Shaffer, D. M., Krauchunas, S. M., Eddy, M., & McBeath, M. K. (2004). How dogs navigate to catch frisbees. *Psychological Science*, 15(7), 437–441.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *Bell system technical journal*, 27, 379–427.
- Srinivasan, M. (1998). Insects as gibsonian animals. *Ecological Psychology*, 10(3-4), 251–270.

- Todd, J. T. (1981). Visual information about moving objects. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 7(4), 975–810.
- Tresilian, J. R. (2005). Hitting a moving target: perception and action in the timing of rapid interceptions. *Perception and Psychophysics*, 67(1), 129–149.
- Tresilian, J. R., Plooy, A. (2006). Systematic changes in the duration and precision of interception in response to variation of amplitude and effector size. *Experimental Brain Research*, 171(4), 421–435.
- Tucker, V. A., Tucker, A. E., Akers, K., & Enderson, J. H. (2000). Curved flight paths and sideways vision in peregrine falcons (*Falco peregrinus*). *The Journal of Experimental Biology*, 203(24), 3755–3763.
- Turvey, M. (1977). Contrasting orientations to the theory of visual information processing. *Psychological Review*, 84(1). 67-88.
- Van Doorn, A. J., & Koenderink, J. J. (1982). Temporal properties of the visual detectability of moving spatial white noise. *Experimental Brain Research*, 45(1-2), 179–188.
- Van Soest, A. J., Casius, L. J. R., de Kok, W., Krijger, M., & Meeder, M. (2010). Are fast interceptive actions continuously guided by vision? Revisiting Bootsma and van Wieringen (1990). *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 36(4), 1040–1055.
- Wann, J. P. (1996). Anticipating arrival: Is the tau margin a specious theory? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22(4), 1031–1048.
- Warren Jr, W. H., Young, D. S., & Lee, D. N. (1986). Visual control of step length during running over irregular terrain. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12(3), 259.
- Warren, W. H. (1988). Action modes and laws of control for the visual guidance of action. *Complex Movement Behaviour - The Motor-action controversy* (pp. 339-379). North-Holland, New York, NY.
- Werkhoven, P., Snippe, H. P., & Toet, A. (1992). Visual processing of optic acceleration. *Vision Research*, 32(12), 2313–2329.
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *nature neuroscience*, 3, 1212-1217.

- Zaal, F. T. J. M., & Michaels, C. F. (2003). The information for catching fly balls: Judging and intercepting virtual balls in a CAVE. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 29(3), 537–555.
- Zaal, F. T. J. M., Bongers, R. M., Pepping, G.-J., & Bootsma, R. J. (2012). Base on balls for the Chapman strategy: reassessing Brouwer, Brenner, and Smeets (2002). *Attention Perception & Psychophysics*, 74(7), 1488–1498.
- Zago, M., Bosco, G., Maffei, V., Iosa, M., Ivanenko, Y. P. (2004). Internal models of target motion: expected dynamics overrides measured kinematics in timing manual interceptions. *Journal of Neurophysiology*, 91(4), 1620–1634.
- Zago, M., Bosco, G., Maffei, V., Iosa, M., & Ivanenko, Y. P. (2005). Fast adaptation of the internal model of gravity for manual interceptions: evidence for event dependent learning. *Journal of Neurophysiology*, 93(2), 1055–1068.
- Zhao, H., & Warren, W. H. (2015). On-line and model-based approaches to the visual control of action. *Vision research*, 110, 190-202.

Modelling information-movement relations in interceptive actions

The goal of the present thesis was to understand the operative perception-action relations underlying the kinematic patterns of movement observed in manual and locomotor lateral interception. The introduction sets the stage for this endeavor, calling upon the theoretical concepts of direct perception and information-movement coupling, understood as a particular form of the online control of movement. Whereas a large body of work has demonstrated that interception is based on a prospective (rather than a predictive) control strategy, debate persists as to the double question of (i) what information is that used to regulate the movement and (ii) how this information is used in the regulation of movement. To address these questions our general methodology was based on interception tasks presented in virtual reality settings. In the first experimental chapter (studying manual lateral interception of rectilinear ball trajectories) we demonstrate that neither of the two variables proposed in the literature (i.e., the ball-position related 0th-order variable or the ball-velocity related 1st-order variable) could by themselves explain the kinematic patterns observed. Integrating an modeling approach based on attractor dynamics, the second experimental chapter (studying a similar task) provides first evidence for reliance on a variable of intermediate rather than integer order. In the third experimental chapter (studying locomotor lateral interception of straight and curving ball trajectories) we take our modeling approach one step further and demonstrate that reliance on information of a trajectory-dependent fractional order allows capturing the qualitative and quantitative aspects of the interception behavior observed. In the final chapter we discuss the suggested potential of opening up the information space to non-integer orders for the understanding of perception-action relations.

Keywords: human, perception-action, movement, information, interception, fractional order, model, dynamic.

Modélisation des relations information-mouvement mises en œuvre lors de l'interception d'un mobile

L'objectif de cette thèse est de comprendre le comportement cinématique d'interception latérale manuelle et locomotrice. Dans l'introduction nous montrons que l'étude du mouvement d'interception peut être engagée avec les concepts de la perception directe et du couplage perception-action (contrôle continu du mouvement). De nombreux travaux ont en effet montré qu'une stratégie prospective (par opposition à prédictive) serait mise en œuvre pour intercepter un mobile mais un débat existe quant à la double question (i) quelle information est utilisée pour réguler le mouvement ? (ii) comment est utilisée cette information ? Pour répondre nous avons utilisé la réalité virtuelle comme méthodologie générale. Dans le premier chapitre expérimental (tâche d'interception latérale manuelle de trajectoires rectilignes) nous montrons que les variables environnementales qui ont émergées de la littérature ne peuvent expliquer seules les régulations du mouvement d'interception. Dans le deuxième chapitre expérimental (tâche similaire à la première étude) nous proposons qu'une variable d'ordre intermédiaire plutôt qu'entier pourrait guider le mouvement. Enfin dans le troisième chapitre expérimental (tâche d'interception latérale locomotrice de trajectoires rectilignes et curvilignes) nous apportons des éléments de preuve en faveur du concept d'information d'ordre fractionnaire qui augmenterait au cours de l'action. Nous développons dans ces deux dernières études deux modèles dynamiques (pour l'interception manuelle et locomotrice, respectivement) qui nous permettent de simuler de façon satisfaisante le comportement cinématique d'interception latérale pour une situation donnée. Plus généralement, nous suggérons, quant à l'ensemble des modèles dynamiques formalisant les interactions perception-action, que cette proposition conceptuelle pourrait permettre de plus larges avancées encore si l'on considérait désormais l'éventuelle sensibilité des différents organismes vivants aux informations d'ordre intermédiaire plutôt que nécessairement entier.

Mots clés: humain, perception-action, mouvement, information, interception, ordre fractionnaire, modèle, dynamique.