

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES	4
PREAMBULE.....	6
INTRODUCTION	7
CHAPITRE 1 : Cadre théorique.....	11
1. Introduction à l'approche écologique de la perception et de l'action	12
1.1. Les postulats fondateurs.....	12
1.1.1. La Perception directe.....	12
1.1.2. Le Système Agent-Environnement	13
1.1.3. Le Cycle Perception-Action	14
1.2. Présentation des concepts clés	15
1.2.1. La Configuration optique	16
1.2.2. Le Flux optique	18
1.2.3. Les Invariants	19
1.2.4. Les Informations	21
2. Présentation d'invariants utiles au contrôle des déplacements.....	22
2.1. Percevoir son déplacement.....	22
2.1.1. La direction de déplacement	22
2.1.2. La vitesse de déplacement.....	24
3. Le couplage Perception-Action	26
3.1. Les différents niveaux d'analyse	26
3.1.1. Couplage Information-Mouvement.....	27
3.1.2. Couplage Perception-Actuation	29
3.2. Expressions comportementales du couplage Information-Mouvement.....	31
3.3. Les Lois de contrôle.....	33
3.3.1. Définition, fonctionnement et caractéristiques des lois de contrôle.....	33
3.3.2. Les tâches d'interception.....	36
3.3.2.1. La loi de contrôle Vitesse Requise	36
3.3.2.2. La loi de contrôle 'maintien de l'angle de relèvement constant' (CBA).....	42

3.3.3.2.1.	<i>Dispositif expérimental utilisé pour tester la loi de contrôle CBA.....</i>	42
3.3.3.2.2.	<i>Présentation de l'information prise en compte et de la variable d'offset.....</i>	43
3.3.3.2.3.	<i>Manipuler l'information en modifiant le déplacement du mobile.</i>	47
3.3.3.2.4.	<i>Cas particulier des trajectoires courbées.....</i>	50
3.3.3.2.5.	<i>Différentes possibilités d'accéder à l'information</i>	53
4.	Problématique de la thèse	59
CHAPITRE 2 :	L'interception et ses différentes lois de contrôle	62
1.	Interception d'un mobile dans un environnement riche	62
2.	Quelles informations pour réguler les déplacements ?.....	89
2.1.	Le contrôle visuel de la locomotion	89
2.2.	Complémentarité des lois de contrôle.....	102
CHAPITRE 3:	Un principe de contrôle et différents agents.....	120
1.	Effet de l'âge sur un principe de contrôle	120
2.	Influence du mode d'accès proprioceptif sur un principe de contrôle	148
DISCUSSION GENERALE		172
1.	Flexibilité des mécanismes perceptivo-moteurs	176
1.1.	Complémentarité des différents modes d'accès à l'information.....	176
1.2.	La complémentarité des informations	178
1.3.	Flexibilité et lois de contrôle	180
2.	Quelle place pour notre modèle "CBA-borné" ?.....	184
2.1.	Les limites du CBA	184
2.2.	Le modèle « CBA-borné »	185
2.3.	Le niveau d'analyse	187
CONCLUSION		190
BIBLIOGRAPHIE.....		192

PREAMBULE

Ce travail de thèse a fait l'objet de cinq articles publiés (2) ou en cours de publication (3) dans des revues internationales. Ces contributions sont présentées dans la partie centrale de ce manuscrit.

Article 1 : Morice, A.H., François, M., Jacobs, D.M., & Montagne, G. (2010). *Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled*. Exp Brain Res. 202(2) :397-411.

Article 2 : François, M., Morice, A.H., Bootsma, R.J., & Montagne, G. (under review). *The visual control of walking velocity*. NeuroSci Res.

Article 3 : François, M., Morice, A.H.P., Bootsma, R.J., & Montagne, G. (submitted). *The complementary use of laws of control*.

Article 4 : François, M., Morice A.H., Blouin J., & Montagne, G. (in press). *Age-related decline in sensory processing for locomotion and interception*. Neurosci.

Article 5 : Morice. A.H., François, M., Blouin, J., & Montagne, G. (submitted). *Coping with decline of visual and proprioceptive sensory processing in interception*.

INTRODUCTION

La pratique du football américain, des enfants faisant une partie d'auto-tamponneuses ou encore un prédateur à la poursuite de sa proie sont autant de situations différentes par leur nature (compétition, jeu, chasse), les acteurs mis en jeu (des experts, des enfants, des animaux) ou encore le monde auquel ils appartiennent (humain ou animal). Bien que différentes, ces situations impliquent cependant toutes des actions d'interception. En effet, tandis que le footballeur américain tentera d'intercepter une passe du *quarterback*, l'enfant tentera de rentrer en collision avec une autre voiture et l'animal tentera d'intercepter une proie.

Le football américain, dont le caractère spectaculaire des interceptions réalisées n'est plus à démontrer (Figure 1), est un sport collectif qui consiste à amener le ballon dans la zone d'en-but adverse et qui repose essentiellement sur un jeu de passes et de réceptions. Ainsi, après que le *quarterback* ait lancé le ballon, le réceptionneur devra se démarquer de la défense dans un premier temps par des changements de direction, pour ensuite se déplacer de manière à arriver au bon moment à la retombée du ballon, tout en évitant les tentatives de plaquages des derniers défenseurs.



Figure 1 : Réalisation d'une Interception réussie par un « *wide receiver* » (n°87) dans une position acrobatique.

Toutes ces contraintes de jeu amènent les joueurs à devoir réaliser des interceptions qui peuvent s'avérer dangereuses (Figure 1). On peut facilement comprendre pourquoi ce genre d'action a fait du football américain un sport spectaculaire. On peut également aisément imaginer la difficulté de la tâche et les contraintes à la fois spatiales et temporelles qui participent à sa réalisation. De la même manière que le footballeur américain, qu'il s'agisse

d'un prédateur qui poursuit sa proie ou d'un enfant qui essaie d'entrer en collision avec une auto-tamponneuse, tous deux doivent constamment faire face à des contraintes environnementales (arbres, rochers, voitures) ainsi qu'à des changements de direction et/ou de vitesse du mobile (proie/voiture) pour réussir leur interception. Ces actions d'interception consistent donc toujours à réguler le comportement locomoteur, de manière à arriver au bon endroit au bon moment.

Quelles sont les stratégies perceptivo-motrices qui permettent de faire face à ces contraintes spatio-temporelles afin de réussir l'interception ?

Dans l'approche écologique de la perception et de l'action dont Gibson est à l'origine (1950, 1979), les mécanismes perceptivo-moteurs sous-tendant ces actions d'interception de mobiles ont fait l'objet de nombreuses études. La logique de cette approche peut se décliner en trois étapes. Tout d'abord, elle consiste à identifier le support informationnel utile et pertinent au regard d'une action particulière. La deuxième étape a pour but de vérifier la sensibilité de l'agent (homme ou animal) à ce support informationnel, ainsi que sa capacité à l'utiliser à des fins de régulation. Enfin, la troisième étape de l'approche écologique vise à expliquer les comportements produits par des agents dans diverses actions finalisées, au travers de lois de contrôle (Warren, 1988). Ces lois de contrôle peuvent être définies comme la formalisation mathématique de la relation qui lie une information propre à une tâche à un paramètre du mouvement pertinent au regard de l'action. Depuis Chapman (1968), d'autres auteurs (Lenoir, Musch, Janssens, Thiery, & Uyttenhove, 1999a ; Lenoir, Savelsbergh, Musch, Thiery, Uyttenhove, & Janssens, 1999b ; Pollack, 1995) ont proposé un candidat informationnel sur la base duquel un agent (homme) peut réguler son action d'interception sur un plan horizontal: le taux de changement de l'angle de relèvement. Durant les dix années suivantes, grâce aux avancées technologiques (e.g., la réalité virtuelle), de nombreuses études ont pu apporter la preuve que des agents contrôlent leurs déplacements en prenant en compte le taux de changement de l'angle de relèvement. Plus particulièrement, par l'utilisation de protocoles expérimentaux reposant sur une restriction et/ou une dé-corrélation du support informationnel, ces études ont montré que des agents modulent leur accélération sur la base du taux de changement de l'angle de relèvement.

L'objectif de cette thèse est d'explorer les limites d'application de cette stratégie perceptivo-motrice qui consiste pour un agent à moduler son accélération afin d'annuler les

changements de l'angle de relèvement. Pour cela, en utilisant le paradigme des tâches d'interception avec déplacement, nous avons testé la mise en œuvre de cette stratégie (perceptivo-motrice) dans des environnements dont le support informationnel enrichi permettait la mise en œuvre d'autres stratégies perceptivo-motrices. Ensuite, nous avons également éprouvé la robustesse de cette même stratégie (perceptivo-motrice) en testant sa mise en œuvre par différentes populations (sénior, patiente dé-afférentée).

Lors du premier chapitre, nous définirons les contours théoriques de l'approche écologique de la perception et de l'action dans laquelle cette thèse se place, afin de mieux comprendre comment les notions d'information et de loi de contrôle ont été pensées par Gibson (1950, 1979). Ensuite, nous verrons quelles informations peuvent nous être utiles pour contrôler nos actions de déplacement et d'interception. Enfin, au travers de différentes études, nous illustrerons comment les lois de contrôle peuvent être utilisées dans le contrôle de différentes actions telles que la locomotion ou l'interception de cibles mobiles. En ce qui concerne les tâches d'interception, nous nous intéresserons plus particulièrement à la loi de contrôle CBA qui relie le taux de changement de l'angle de relèvement à l'accélération de l'agent.

Les expérimentations réalisées au cours de cette thèse sont présentées dans les deux chapitres expérimentaux qui suivent. Le premier axe de réflexion se divise en deux étapes. Premièrement, nous verrons de quelle façon un agent va utiliser la loi de contrôle CBA lorsque l'environnement lui offre la possibilité d'utiliser d'autres lois de contrôle. Deuxièmement, nous verrons de quelle manière les agents contrôlent leur action lorsque les informations utilisées sont dé-corrélées. Le deuxième axe de réflexion a pour objectif de définir dans quelle mesure la stratégie perceptivo-motrice reposant sur l'utilisation du taux de changement de l'angle de relèvement, peut être utilisée dans des tâches d'interception par des populations présentant des particularités neurophysiologiques.

Enfin, dans le dernier chapitre nous présenterons dans un premier temps les principaux résultats obtenus pour ensuite les situer par rapport à la littérature. Nous dresserons ce bilan des résultats en deux temps. Tout d'abord, nous montrerons de quelle manière nos résultats soulignent la flexibilité du système perceptivo-moteur. Dans un deuxième temps, nous situerons le travail de modélisation accompli au regard de différents niveaux d'analyse du couplage perception-action.

CHAPITRE 1

Cadre théorique

1. Introduction à l'approche écologique de la perception et de l'action

L'approche écologique est issue des travaux de Gibson (1950, 1958/98, 1979) sur la perception et l'action. En proposant un nouveau cadre conceptuel qui rejette les postulats de base des approches cognitives, cette approche écologique se veut novatrice.

1.1. Les postulats fondateurs

1.1.1. La Perception directe

Dans l'approche cognitive, pour agir ou percevoir, il est nécessaire de recourir à des représentations mentales perceptives ou motrices stockées en mémoire. L'approche écologique rejette cette nécessité de faire appel à des processus cognitifs intermédiaires pour reconstruire ce que l'on perçoit. Pour Gibson, un agent doit pouvoir percevoir ou agir sur la base de variables perceptives sans que cela nécessite d'inférences. Runeson (1977) a choisi la métaphore du planimètre pour mettre en évidence le fait qu'un agent peut accéder directement à une propriété complexe de l'environnement. Le planimètre polaire est un instrument mécanique très simple, composé d'un bras polaire, d'un bras extérieur et d'une petite roue (Figure 2), permettant de mesurer mécaniquement et directement l'aire d'une surface.

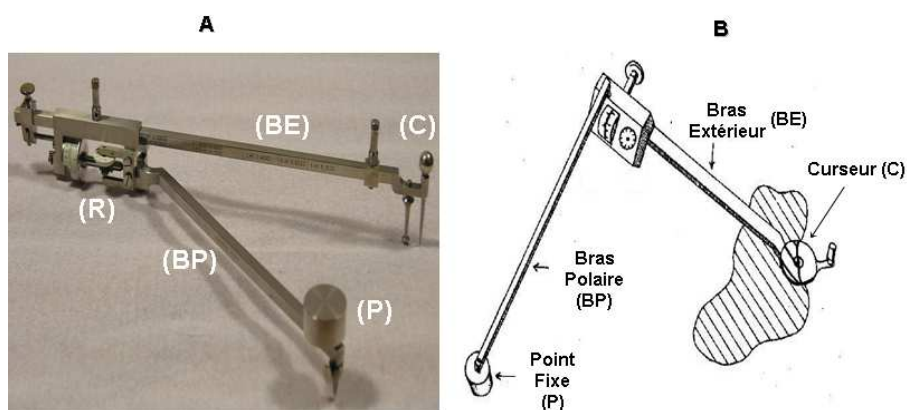


Figure 2: (A) Représentation d'un planimètre moderne encore utilisé de nos jours, composé d'un bras polaire (BP), d'un bras extérieur (BE) fixé à l'autre extrémité du bras polaire autour de laquelle il peut tourner librement, d'un curseur (C), d'un point fixe (P) et d'une roulette (R). (B) Représentation schématique du planimètre dont le fonctionnement consiste à parcourir le périmètre de la surface à mesurer (hachurée) par le curseur (C) situé au bout du bras extérieur (BE). Une fois que le curseur aura fait un tour, la roue (R) indiquera l'aire de la surface hachurée (modifié d'après Michaels & Carello, 1981).

De la même manière que cet instrument permet d'accéder directement et simplement à des propriétés complexes (e.g., la surface) sans avoir eu connaissance au préalable de toutes les variables permettant son calcul (e.g., des angles ou des distances), un agent doit aussi pouvoir accéder directement à des variables perceptives présentes dans l'environnement en utilisant des mécanismes perceptifs simples. Si l'on considère donc le planimètre comme étant un mécanisme perceptif, un agent l'ayant en sa possession pourra percevoir directement des aires de surfaces sans avoir recours à l'utilisation de mécanismes cognitifs complexes pour construire et calculer ces aires. Cette notion de perception simple et directe de variables perceptives contenues dans l'environnement est le point de départ de l'approche écologique de la perception et de l'action et suppose une relation étroite entre l'agent et l'environnement.

1.1.2. Le Système Agent-Environnement

L'approche écologique réfute le dualisme Agent-Environnement et postule que l'agent ne peut être appréhendé en dehors de l'environnement dans lequel il vit. Elle envisage l'interaction d'un agent avec son environnement mais également avec les autres agents qui y vivent, ce que l'on peut résumer par le concept de « niche écologique ». Cette niche écologique peut ensuite évoluer de manière active (e.g., mouvements géologiques, alternance de périodes climatiques) et/ou être le fait des agents qui la peuplent (e.g., construction de barrages par les castors jusqu'à l'urbanisation humaine). Cette perpétuelle modification de l'environnement nécessite une évolution des agents qui doivent s'adapter à ces changements. Ainsi, les capacités de chaque espèce d'agents, de l'insecte à l'humain, doivent être vues comme le reflet d'une exigence de l'environnement. On peut donc facilement imaginer que l'environnement a guidé, façonné les systèmes perceptifs des agents qui y vivent. L'environnement est donc le monde perceptible qui nous entoure mais également celui sur lequel on peut agir. En effet, si l'environnement et l'agent sont liés par les systèmes perceptifs propres à l'agent, ils le sont également par leurs possibilités d'action puisqu'un agent aura un système neuro-musculo-squelettique propre, qui lui permettra d'agir spécifiquement sur son environnement. On parlera dès lors de système Agent-Environnement (SAE). Gibson (1959, 1979) a décrit une notion qui permet d'expliquer et de mieux comprendre ce lien indissociable entre agent et environnement : l'affordance. En accord avec la conceptualisation initiale de Gibson, Warren (1988) explique le choix d'un mode d'action par la perception d'une

affordance¹. Sur la base d'une affordance, une fois le mode d'action choisi, l'agent devra alors contrôler son action. Ce travail de thèse porte précisément sur les mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent le contrôle de l'action.

1.1.3. Le Cycle Perception-Action

L'approche écologique de la perception et de l'action postule que l'agent va pouvoir percevoir directement l'information et procéder au contrôle de l'action grâce à la mise en œuvre de mécanismes de contrôle simples et économiques. Cette interdépendance entre Perception et Action, représentée par une relation de causalité circulaire, place donc la Perception et l'Action au même niveau (Figure 3).

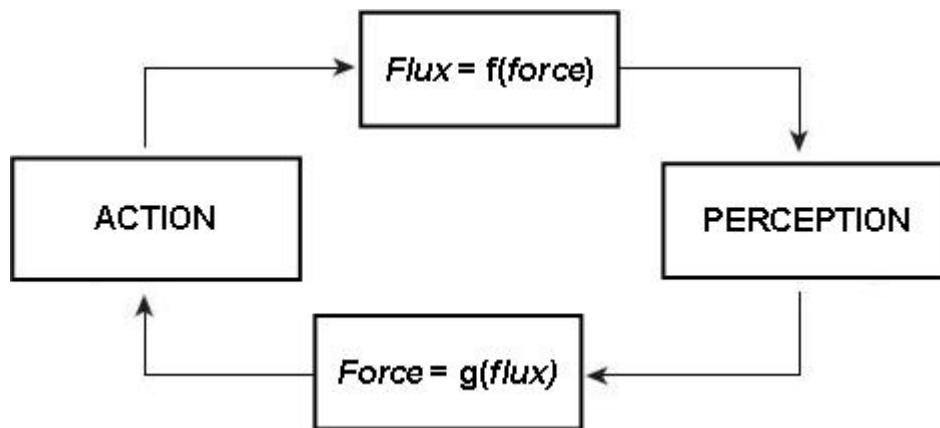


Figure 3: Cycle Perception-Action. La production d'une action par un agent entraîne un flux optique contenant des informations. En percevant ces informations l'agent peut alors contrôler son action en modifiant les forces produites, ce qui modifiera à son tour le flux optique (d'après Kugler & Turvey, 1987).

Lorsque le cycle Perception-Action est initié par la production d'un mouvement de l'agent (ou par la détection d'une information), cela entraîne une modification du flux optique

¹ L'affordance traduit les possibilités d'action offertes par l'environnement référées aux potentialités d'un agent. Les propriétés de l'environnement sont donc perçues selon une échelle de mesure intrinsèque. Ce concept d'affordance a été formalisé et mis en évidence expérimentalement par Warren (1984) dans une tâche consistant à juger du caractère « montable » d'une marche en mode bipédique (i.e., sans s'aider des mains), ou encore dans une tâche consistant à estimer le caractère « passable » d'une ouverture sans tourner les épaules (Warren & Wang, 1987).

qui contient les informations. A partir de la perception de ces informations, l'agent peut alors modifier son action (i.e., les forces produites) en conséquence et ainsi de suite.

Davis et Ayers (1972) ont montré de manière élégante l'existence de cette relation circulaire entre la perception et l'action chez plusieurs espèces d'invertébrés marins. Ils ont soumis ces invertébrés à un flux optique dirigé vers l'arrière (i.e., correspondant à un mouvement vers l'avant) et ont enregistré la locomotion produite. Ils ont montré que le flux optique déclenche non seulement la locomotion, mais également que la vitesse de celui-ci module la vitesse de locomotion produite par ces invertébrés. Pailhous, Ferrandez, Fluckiger et Baumberger (1990) se sont également intéressés à l'influence du flux optique sur la locomotion, mais cette fois-ci chez des humains. Dans cette expérience, les auteurs demandaient aux participants de maintenir une vitesse de marche constante, tandis qu'ils manipulaient la vitesse du flux optique en appliquant un mouvement à la texture du sol. Dans une condition, la texture du sol bougeait dans la même direction que celle du déplacement des participants, ce qui avait pour conséquence une vitesse optique résultante inférieure à la vitesse de déplacement physique des participants. Dans la condition inverse, la texture du sol bougeait dans la direction opposée à la direction de déplacement des participants, ce qui donnait lieu à une vitesse optique résultante supérieure à la vitesse de déplacement physique des participants. Les résultats montrent que dans la condition proposant une vitesse optique résultante inférieure à la vitesse physique produite, les participants augmentent leur vitesse de marche. Dans la condition inverse, les participants réduisent leur vitesse de marche. Ces études permettent de mettre en évidence aussi bien chez l'homme que chez l'animal, cette influence mutuelle et indissociable entre information et mouvement.

1.2. Présentation des concepts clés

Après avoir montré que l'approche écologique prône une perception directe, nous allons maintenant définir point par point les concepts clés permettant de comprendre le concept d'information dans l'approche écologique de la perception et de l'action de Gibson.

1.2.1. La Configuration optique

L'approche écologique de la perception et de l'action a redéfini la stimulation visuelle pour pouvoir parler par la suite de perception directe. Traditionnellement, la stimulation visuelle (i.e., la lumière) est décrite mathématiquement et physiquement comme étant un ensemble d'ondes électromagnétiques visibles par l'homme, chaque onde pouvant être définie par une longueur d'onde et une intensité par exemple. Gibson va dépasser cette description purement physique et reformuler la stimulation visuelle comme correspondant aux patrons d'énergie lumineuse qui parviennent au point d'observation après réflexion sur les diverses surfaces de l'environnement dont les propriétés réfléchissantes sont différentes. Dans l'approche écologique, la stimulation visuelle est alors considérée comme riche et les systèmes perceptifs de l'agent ont été façonnés pour répondre à cette stimulation sans aucun mécanisme cognitif intermédiaire.

Pour Gibson, les patrons d'énergie lumineuse qui parviennent au point d'observation proviennent de deux lumières différentes. Il distingue la lumière « radiale » de la lumière « ambiante ». La lumière « radiale » correspond aux rayons lumineux diffusés par une source lumineuse (e.g., le soleil) qui vont ensuite se réfléchir sur les surfaces qui composent l'environnement. Gibson définit la lumière « ambiante » comme la lumière émanant de cette réflexion des rayons lumineux sur les surfaces de l'environnement. Ainsi, ce processus de réflexion va structurer la lumière « ambiante » de telle sorte qu'à un point d'observation donné correspondra une seule configuration de patrons d'énergie lumineuse appelée « configuration optique » (Figure 4). Cette configuration optique peut être définie comme l'ensemble des angles optiques sous-tendus à un point d'observation donné par les différentes surfaces de l'environnement.

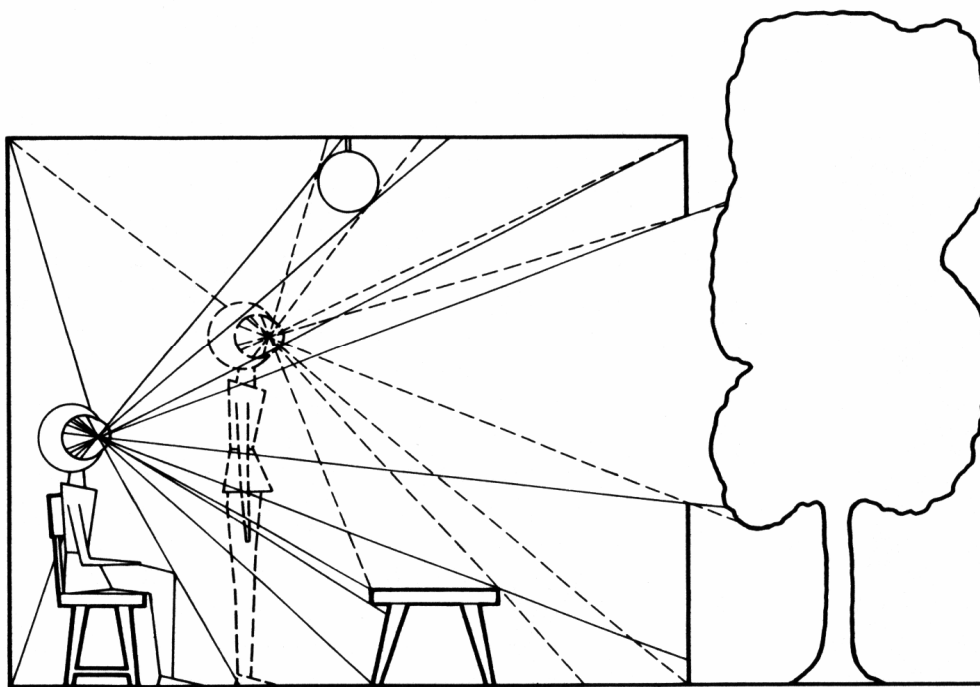


Figure 4: Illustration de configurations optiques obtenues selon deux points d'observation distincts. La configuration optique résulte de l'interaction entre l'agent et l'environnement. Elle peut être définie comme le patron de lumière « ambiante » structuré disponible au point d'observation et résultant des réflexions de la lumière « radiale » par les différentes surfaces de l'environnement (d'après Gibson, 1979).

Cependant, cette structuration optique de l'environnement au point d'observation n'est pas suffisante pour informer l'agent, car pour un point d'observation donné, un même angle optique peut définir deux objets de même forme, de tailles distinctes mais situés à des distances différentes. S'appuyant toujours sur les lois de la physique et de l'optique, Gibson a résolu ce problème en ne prenant plus en compte les configurations optiques, mais les changements de ces configurations optiques au cours du temps.

En suivant l'idée que l'information et le mouvement sont indissociables, Gibson défend la pensée selon laquelle nos mouvements vont créer des transformations optiques dans lesquelles sera contenue l'information. Ces changements de configurations optiques donnent lieu à un « flux optique ».

1.2.2. Le Flux optique

Dès lors que l'environnement ou l'agent bougent, le mouvement a pour conséquence des changements spatio-temporels de configurations optiques qui donnent lieu à un flux optique. Gibson (1950) a décrit ce flux optique par un champ vectoriel au sein duquel chaque élément optique est symbolisé par un vecteur dont l'amplitude, la direction et le sens permettent de caractériser le déplacement optique de l'élément considéré (Figure 5). Le flux créé est ainsi directement lié au déplacement produit par l'agent, spécifiant ainsi à l'agent l'état courant de sa relation avec l'environnement. On distinguera deux types de flux optique: le flux « local » et le flux « global ».

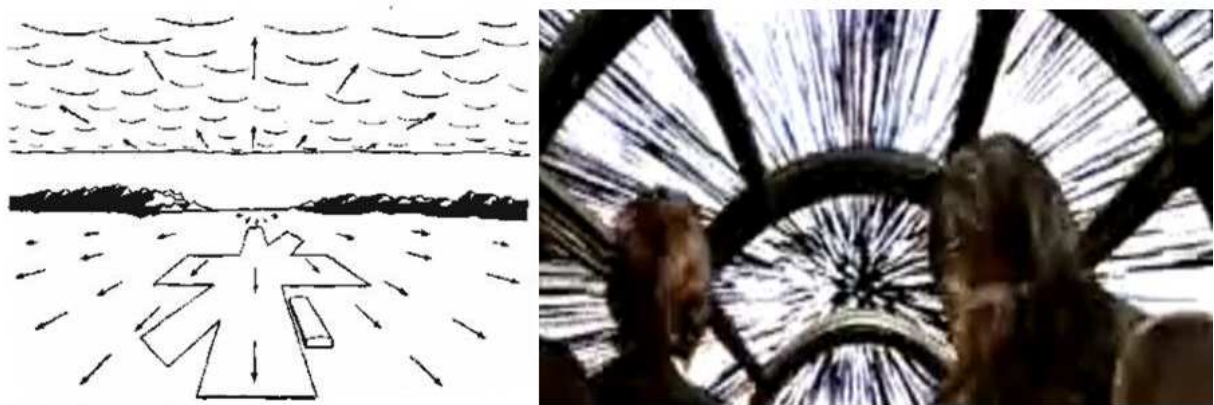


Figure 5 : A gauche, Représentation du flux optique obtenu par un pilote d'avion lors d'un survol d'une piste d'atterrissage. Chaque vecteur représente le mouvement optique de l'élément de l'environnement qui lui correspond (d'après Gibson, 1950). A droite, illustration de la notion de flux optique observé à bord du vaisseau spatiale de Han Solo.

Le flux local correspond au flux optique qui résulte des déplacements d'un ou plusieurs éléments de l'environnement par rapport à l'individu. Le flux global correspond au flux optique résultant des déplacements de l'agent dans l'environnement. Ainsi, contrairement au flux local, tous les éléments constitutifs de la configuration optique subiront un déplacement et créeront un flux optique. Dans nos activités quotidiennes, ces deux types de flux optiques sont généralement combinés. Si l'on reprend par exemple le cas de notre joueur de football américain, son déplacement créera un flux global tandis qu'un flux local sera créé par le déplacement du ballon ainsi que par celui des autres joueurs.

Les travaux réalisés au cours de cette thèse se sont intéressés à des tâches d'interception offrant une combinaison des deux types de flux optiques présentés précédemment.

1.2.3. Les Invariants

Pour Gibson (1958), c'est dans les transformations du flux optique qu'un agent pourra trouver un support informationnel car malgré des changements continus, le flux optique présente des styles de changements qui sont préservés (i.e., des invariances) et qui permettent d'informer le sujet sur l'état de sa relation avec l'environnement (Michaels & Carello, 1981; Warren, 1988). Cela fait maintenant plus de cinquante ans que Gibson (1958) a formulé plusieurs invariants sur la base desquels les agents (humains et animaux) peuvent contrôler leur locomotion dans leur environnement. De par leur nature, il est possible de différencier deux types d'invariants : les invariants « structuraux » et les invariants « transformationnels ». Afin d'avoir une vue d'ensemble, de la même manière que pour le flux optique, les deux types d'invariants optiques seront brièvement décrits. Cependant, les travaux réalisés au cours de cette thèse se sont principalement intéressés aux invariants « transformationnels ».

Le premier type d'invariant est lié aux caractéristiques de la structure de l'objet (i.e., la taille, la forme, la composition, etc). Ces invariants sont qualifiés d' « invariants structuraux » car ils renseignent l'agent sur la permanence de l'organisation des surfaces de l'environnement. Par exemple, quel que soit le mouvement de l'agent et les éléments de l'environnement, le flux optique est représenté par un champ vectoriel dont les éléments les plus proches de l'agent sont ceux qui possèdent la plus grande vitesse optique (i.e., représentés par une plus grande amplitude de vecteur) et inversement. Cette structuration optique, la parallaxe de mouvement, est par exemple un invariant structural sur lequel l'agent peut se baser pour connaître les distances relatives qui séparent les différents éléments de l'environnement.

Le deuxième type d'invariants est dit « invariant transformationnel » car il correspond à la « constance dans le changement » (Michaels & Carello, 1981). Il renseigne l'agent sur l'état de sa relation avec l'environnement. Pour illustrer ce type d'invariant, prenons l'exemple d'un agent stationnaire désirant éviter une balle se rapprochant de lui. Dès que la balle se rapprochera de l'agent, ce déplacement donnera lieu à une expansion optique de l'objet sur la rétine de l'agent. Cette expansion optique peut être exprimée formellement comme l'évolution au cours du temps de l'angle optique (ϕ) sous-tendu au point d'observation par les contours de l'objet (Figure 6). En prenant en compte l'expansion

optique (i.e., le changement de l'angle optique au cours du temps), Lee (1976) a défini un invariant optique nommé *tau* (τ) qui permet d'accéder à la relation temporelle de premier ordre (TC_1) entre l'objet et l'agent (i.e., le temps avant collision) (Equation 1) :

$$\tau = \varphi / \dot{\varphi} = - D / \dot{D} = TC_1 \quad (\text{Equation 1})$$

avec φ correspondant à l'angle optique courant sous-tendu au point d'observation par les contours de l'objet, $\dot{\varphi}$ correspondant à la vitesse d'expansion de l'angle optique, D représentant la distance qui sépare le point d'observation de l'objet, et TC_1 correspondant au temps de pré-contact de premier ordre entre l'objet et le point d'observation.

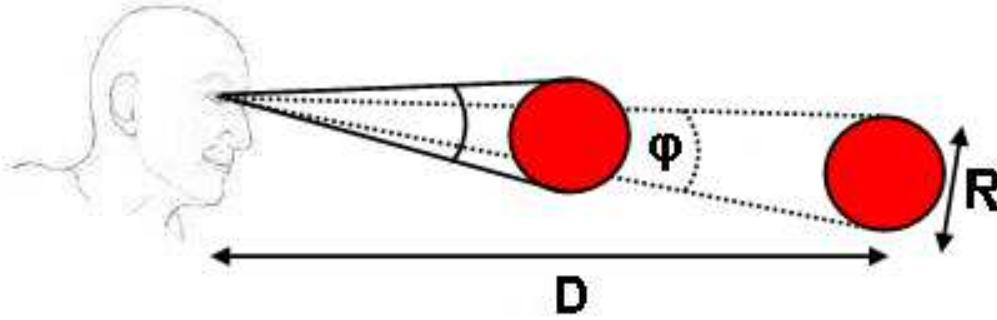


Figure 6: Exemple d'une balle de taille (R), située à une distance (D) d'un agent et qui se dirige vers l'agent à vitesse constante. L'angle optique (φ) correspond à l'angle sous-tendu au point d'observation par les contours de l'objet. L'information est l'invariant optique *tau* (τ) qui correspond à l'inverse de la vitesse relative d'expansion des contours de l'objet. Cette information spécifie le temps de pré-contact de premier ordre (TC_1) entre l'agent et l'objet.

Tau (τ) correspond à l'inverse de la vitesse relative d'expansion optique des contours de l'objet (ou d'une surface de l'environnement). Comme $\varphi / \dot{\varphi} = - D / \dot{D}$, le rapport $\varphi / \dot{\varphi}$ spécifie à lui seul le temps qui doit encore s'écouler jusqu'au moment du contact (i.e., le temps de pré-contact de premier ordre ou TC_1). En effet, même si la taille physique, la distance physique et la vitesse physique de l'objet sont inconnues, le temps de pré-contact est directement disponible puisque celui-ci est complètement déterminé par des variables optiques. *Tau* informe donc directement l'agent de sa relation temporelle de premier ordre avec l'objet. Il a par exemple été montré expérimentalement que cet invariant est utilisé non seulement pour estimer le temps restant avant collision avec un objet mais également pour

contrôler l'action dans des tâches d'évitement de collision (Benguigui, Ripoll, & Broderick, 2003; Lobjois, Benguigui, Bertsch, & Broderick, 2008).

1.2.4. Les Informations

Dans l'approche écologique, dès lors qu'ils seront détectés et utilisés par un agent, ces invariants accèdent au statut d'information. Pour Gibson, l'information correspond donc à un invariant qui serait perçu dans le flux optique et utilisé par l'agent pour contrôler son action. Si l'on reprend l'exemple de l'invariant *Tau* (Figure 6), de nombreuses études se sont intéressées à l'utilisation ou non de ce dernier par un agent pour contrôler son action dans différentes tâches. Par exemple, Savelsbergh, Whiting et Bootsma (1991) ont émis l'hypothèse selon laquelle un agent contrôlait son mouvement de capture de balle sur la base de *tau*. Pour tester cette hypothèse, les auteurs ont manipulé le diamètre des balles (un gros diamètre et un petit diamètre, G et P sur la Figure 7, respectivement). De plus, dans une troisième condition les auteurs diminuaient la taille physique de la balle durant sa phase d'approche (D sur la Figure 7). En manipulant ainsi la taille physique les auteurs manipulaient l'expansion optique de la balle et donc l'invariant *tau*. Si cet invariant est utilisé par les agents pour contrôler leur action, lorsque l'expansion est manipulée, les agents devraient produire un profil d'ouverture de la main différent de ceux produits en condition normale.

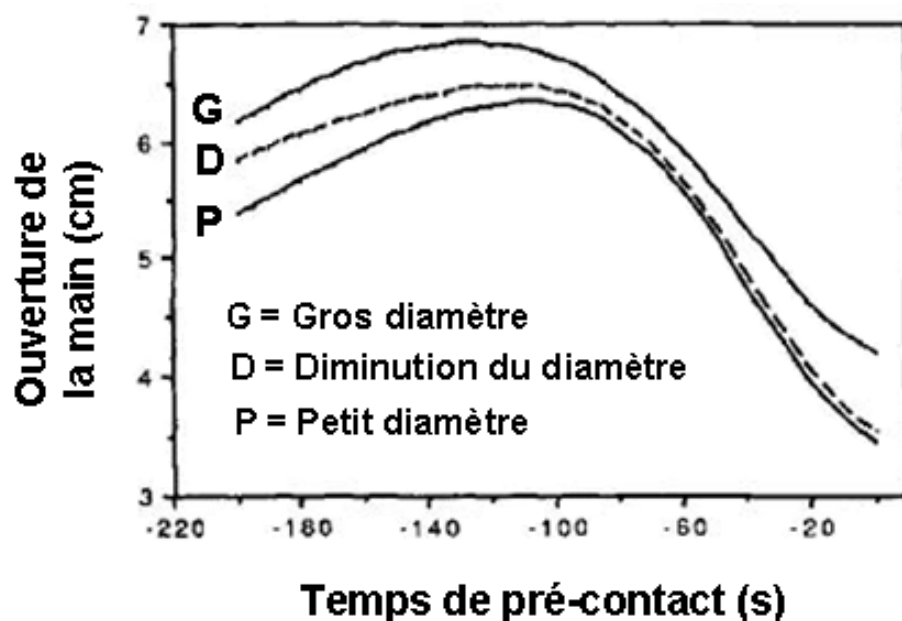


Figure 7 : Evolution de l'ouverture des mains des participants en fonction du temps restant avant le contact avec une balle de petit diamètre (P), une balle de diamètre plus large (L) et une balle dont le diamètre diminuait en cours d'approche (D). Au fur et à mesure que la taille de la balle change, le patron d'ouverture de la main change également (modifié d'après Savelsbergh et al., 1991).

Les résultats obtenus sont en accord avec ces prédictions. En effet, le patron d'ouverture enregistré lorsque l'expansion optique est manipulée est différent de ceux obtenus lorsque la taille de balle reste constante. De plus, ce patron de fermeture des doigts évolue de concert avec l'évolution de la taille de la balle au cours de l'approche. Ces résultats traduisent donc la prise en compte de l'expansion optique dans le contrôle d'une action de capture de balle. Les auteurs en concluent que l'information testée (i.e., *tau*) est utilisée et participe au contrôle de ce type d'action. D'autres résultats ont montré que *tau* est également utilisé aussi bien par des humains dans des tâches de régulation de la locomotion (Lee, Lishman, & Thomson, 1982) ou de freinage (Lee, 1976), que par des pigeons lors du contrôle de leur déplacement vers un objet (Lee, Davis, Green, & van der Weel, 1993).

Le cœur de ce travail de thèse porte principalement sur la fonction d'un invariant transformationnel particulier (le taux de changement de l'angle de relèvement) dans le contrôle des actions d'interception locomotrices.

2. Présentation d'invariants utiles au contrôle des déplacements

2.1. Percevoir son déplacement

Nous l'avons vu précédemment, dès lors que l'agent produira un déplacement, celui-ci créera un flux optique (Figure 5) dans lequel plusieurs invariants sont disponibles. Dès qu'ils seront détectés et utilisés, ces invariants accèdent au statut d'information et renseignent l'agent sur certaines caractéristiques de son déplacement que nous allons détailler maintenant.

2.1.1. La direction de déplacement

Dans des tâches imposant des contraintes spatiales fortes (e.g., un agent évoluant dans une foule), une détection précise et directe de la direction du déplacement est nécessaire. Gibson (1958) a décrit un invariant optique qui pouvait renseigner les agents sur la direction de leur déplacement : le focus d'expansion optique (FEO). Ce FEO correspond à un point stationnaire, à partir duquel tous les éléments du flux optique subissent un déplacement centrifuge et qui informe directement l'agent sur la direction de son déplacement. Une étude

réalisée par Warren, Morris et Kalish (1988) s'est intéressée à la capacité des participants à percevoir et estimer la direction de déplacement sur la base du FEO dans des environnements plus ou moins riches (i.e., avec des densités de texture plus ou moins importantes). Les auteurs se sont également intéressés à différents types de déplacement en translation. Ils ont montré qu'en moyenne, même pour des vitesses proches de celle de la locomotion (1m/s), les participants estiment la direction de déplacement avec une précision de 1.2°. La stratégie d'utilisation de ce FEO par un agent, dans le cadre de la régulation de la direction de ses déplacements, est très simple puisqu'elle consistera à aligner le FEO sur la cible vers laquelle il voudra se diriger (e.g., un arbre ou bien un intervalle entre deux obstacles). Si le FEO est décalé par rapport à la cible, alors l'agent devra modifier son mouvement pour faire en sorte de placer le FEO précisément sur la cible qu'il souhaite atteindre. Une fois que le FEO est correctement aligné sur la cible, l'agent n'a plus qu'à s'assurer que le FEO reste ancré sur celle-ci. Il a été montré, dans une tâche de guidage locomoteur, qu'une telle stratégie est utilisée pour contrôler l'action (Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001).

Le FEO n'est cependant pas la seule information permettant à un agent de se diriger vers une cible. En effet, même en pleine obscurité, nous sommes capables de nous diriger vers une cible lumineuse (e.g., un minuteur éclairé) et de l'atteindre. Une stratégie simple qui nous permet de nous diriger dans ce genre de situation consistera à référer le but à atteindre à l'axe corporel médian ou à l'axe locomoteur (Telford, Howard, & Ohmi, 1995). Une fois la cible référée à l'axe corporel médian, cette nouvelle direction est alors appelée Direction Egocentrique. Des études ont montré que cette Direction Egocentrique est accessible sur la base de signaux proprioceptifs des muscles du cou et des yeux (Roll, Velay, & Roll, 1991), et sur la base de signaux vestibulaires (Karnath, Sievering, & Fetter, 1994). Il a également été montré qu'on peut aussi accéder à cette information sur la base de signaux rétiniens dans des tâches de locomotion (Llewellyn, 1971 ; Rushton, Harris, Lloyd, & Wann, 1998). La stratégie fondée sur la prise en compte de la Direction Egocentrique consistera donc d'abord à fixer le regard sur la cible, diriger la tête vers la cible, orienter le tronc par rapport à la tête, tourner l'axe corporel médian vers la cible, pour ensuite se déplacer vers elle (Rushton et al., 1998; Rushton & Salvucci, 2001).

2.1.2. La vitesse de déplacement

Bien qu'il existe une multitude d'invariants optiques susceptibles de spécifier la vitesse de déplacement, nous nous sommes intéressés à deux invariants en particulier: Global Optical Flow Rate (ou *GOFR*) et Edge Rate (ou *ER*). Cela fait maintenant presque trente ans que Warren (1982) a formalisé pour la première fois ces deux invariants.

Le premier invariant cité (*GOFR*) correspond, pour une direction de déplacement donnée, à la vitesse angulaire des éléments de texture sous-tendue au point d'observation. Cette vitesse angulaire est définie mathématiquement (Equation 2) par la vitesse de déplacement divisée par la hauteur du point d'observation (i.e., la hauteur des yeux) :

$$GOFR = \dot{Y} / HE \quad (\text{Equation 2})$$

avec $\dot{Y}$ correspondant à la vitesse de déplacement de l'agent, *HE* correspondant à la hauteur des yeux de l'agent et *GOFR* correspondant à la vitesse angulaire optique des éléments de texture.

Cet invariant spécifie la vitesse de déplacement en unité de hauteur des yeux par unité de temps (Larish & Flach, 1990). De plus, *GOFR* varie directement avec la vitesse de déplacement et est inversement proportionnel à la hauteur des yeux (Figure 8A). En revanche, *GOFR* est indépendant de la densité de texture du flux (Figure 8A).

Pour une direction donnée et un point d'observation donné, le deuxième invariant cité (*ER*) peut être défini comme le nombre de discontinuités de texture (i.e, le nombre d'éléments) par unité de temps qui passent par un point de référence fixe situé dans le champ de vision du point d'observation (Larish & Flach, 1990) :

$$ER = \dot{Y}/D \quad (\text{Equation 3})$$

avec $\dot{Y}$ correspondant à la vitesse de déplacement des agents, D correspondant à la densité de texture définie par le nombre d'éléments qui la constituent et ER correspondant à la fréquence de défilement des éléments de texture.

Cet invariant spécifie la vitesse de déplacement en nombre d'éléments de texture par unité de temps. ER est donc directement dépendant de la densité de texture du flux, mais est indépendant de la hauteur des yeux (Figure 8B).

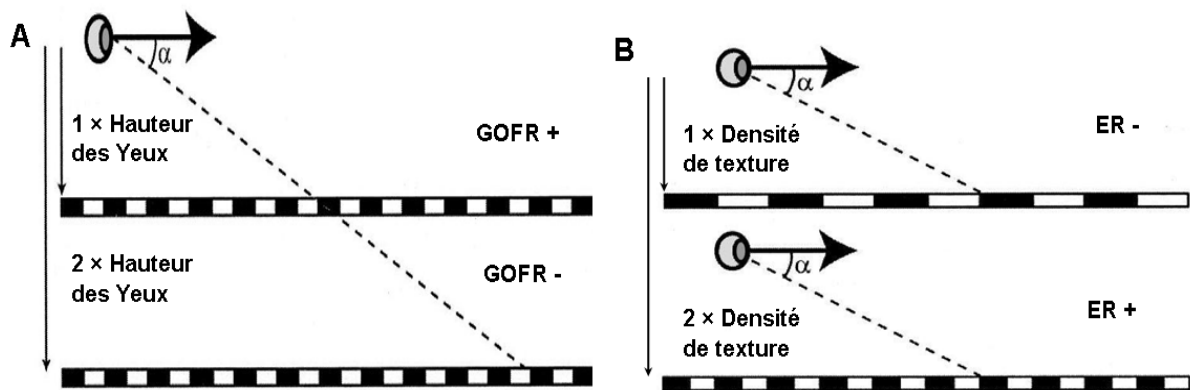


Figure 8: Représentation schématique des invariants optiques spécifiant la vitesse de déplacement pour une direction visuelle donnée (α). (A) Global Optical Flow Rate (GOFR) correspond à la vitesse angulaire des éléments de texture. GOFR est indépendant de la densité de la texture et est inversement proportionnel à la hauteur des yeux. Ainsi plus le point d'observation est élevé par rapport au sol plus GOFR est faible. (B) Edge Rate (ER) correspond au nombre d'éléments de texture par unité de temps qui passent par un point fixe. Il dépend de la densité de texture et est indépendant de la hauteur des yeux. Ainsi, plus la texture est dense, plus ER sera élevé (modifié d'après Fajen, 2005b).

Depuis que ces invariants ($GOFR$ et ER) ont été formalisés par Warren (1982), de nombreuses études ont voulu tester leur utilisation par un agent pour percevoir la vitesse de déplacement (Ballard, Roach, & Dyre, 1998 ; Dyre, 1997 ; Larish & Flach, 1990) ou bien pour contrôler son action (Fajen, 2005b). Bien que ces études soient en désaccord quant à la dominance d'un invariant sur l'autre (Ballard, Roach, & Dyre, 1998 ; Dyre, 1997 ; Larish & Flach, 1990 ; Fajen, 2005b), elles montrent toutes que ces deux invariants sont utilisés de concert par les participants pour accéder optiquement à leur vitesse de déplacement.

Cette présentation de quelques invariants susceptibles d'être utilisés dans la perception du déplacement montre la richesse du support informationnel disponible dans le flux optique.

Cette richesse informationnelle permet une certaine redondance dans la spécification d'une propriété du système Agent-Environnement. Ainsi, l'identification des invariants ne suffit pas à prouver leur utilisation. Il est nécessaire de connaître les mécanismes de prise en compte d'un invariant par l'agent dans le contrôle de son action pour être en mesure de prédire précisément les conséquences comportementales de son utilisation. Cela impose aux chercheurs un choix du niveau d'analyse à partir duquel ils désirent expliquer le couplage perceptivo-moteur (Bootsma, 1998). L'objectif du prochain paragraphe consistera à expliquer et distinguer deux niveaux d'analyse.

3. Le couplage Perception-Action

3.1. Les différents niveaux d'analyse

Bootsma (1998) propose de distinguer deux niveaux d'analyse permettant de rendre compte du couplage perception-action : le couplage Information-Mouvement et le couplage Perception-Actuation (Figure 9).

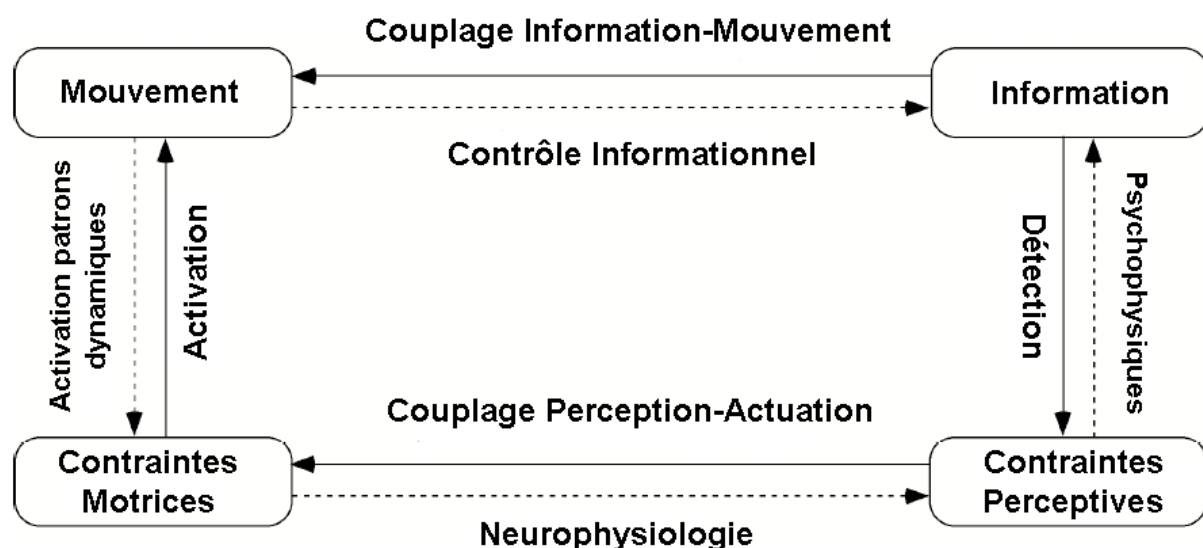


Figure 9: Représentation schématique des deux niveaux de modélisation du couplage perception-action. Le couplage Information-Mouvement correspond aux relations fonctionnelles liant l'information et le mouvement tandis que le couplage Perception-Actuation correspond à l'intégration des caractéristiques neuro-musculo-squelettiques propres à l'agent considéré. Les flèches pleines représentent les processus impliqués et les flèches en pointillés désignent les outils utilisés pour étudier les processus mis en jeu (modifié d'après Bootsma, 1998).

3.1.1. Couplage Information-Mouvement

Plusieurs études se sont attachées à analyser les relations fonctionnelles qui existent entre l'information et le mouvement dans différentes tâches (Bootsma & Van Wieringen, 1990; Montagne, Cornus, Glize, & Quaine, 2000). Dans le cadre de ce niveau d'analyse, on s'intéresse aux mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent une action finalisée. Ce niveau d'analyse peut se décliner en deux étapes. La première consiste à démontrer d'un angle de vue comportemental que les agents sont sensibles aux informations testées et qu'ils sont à même de les utiliser dans le contrôle de l'action. Ensuite, le chercheur aura à cœur d'identifier les lois générales, indépendantes du système perceptivo-moteur (i.e., de l'agent), qui permettront d'expliquer comment l'agent organise son comportement au regard des conditions d'exécutions. Ces lois générales expliquent la façon dont les variables informationnelles modulent les variables motrices de l'action en cours. S'intéressant au contrôle de différentes actions de locomotion (initiation/arrêt d'un déplacement, guidage d'un déplacement, intercepter/éviter un mobile...), Gibson, en 1979, parlait de « règles pour le contrôle de la locomotion ». Plus tard, Warren (1988) a proposé le concept de « loi de contrôle » pour souligner leur caractère systématique dans la relation entre l'information et le mouvement. Ce niveau de couplage se situe à l'interface entre l'agent et l'environnement et permet donc, à lui seul, de rendre compte du comportement produit. De plus, ce niveau d'analyse ne prend pas en compte les caractéristiques neurophysiologiques et biomécaniques de l'agent. Ainsi, quel que soit l'agent, dès lors qu'il possède un système perceptif permettant la détection de l'information considérée, la même loi de contrôle peut théoriquement expliquer le comportement de régulation produit.

Srinivasan, Lehrer, Kirchner et Zhang (1991) ont évoqué l'utilisation par des abeilles de la stratégie d'égalisation visuelle des vitesses latérales du flux optique pour se déplacer dans un tunnel dont les murs pouvaient être bougés indépendamment l'un de l'autre (Figure 10A). Afin de tester cette stratégie, les auteurs ont par exemple imprimé au mur droit un mouvement dans la direction opposée à celle des abeilles afin d'induire une vitesse optique latérale plus importante à droite. Dans le cas de l'utilisation de la stratégie d'égalisation visuelle des vitesses latérales du flux optique, les abeilles devraient se déplacer latéralement vers le mur opposé (Figure 10A). Les auteurs ont obtenu des résultats conformes aux prédictions, suggérant ainsi l'utilisation de cette stratégie par des abeilles. Duchon et Warren (2002) ont repris ce protocole en utilisant un dispositif de réalité virtuelle (Figure 10B) afin de tester

cette stratégie chez l'homme. Les auteurs ont observé les mêmes régulations comportementales que celles rapportées par Srinivasan et al. (1991). De plus, Duchon et Warren (2002) ont montré que l'amplitude de ces déplacements latéraux vers le mur opposé est d'autant plus importante que la vitesse du mur l'est également (Figure 10C).

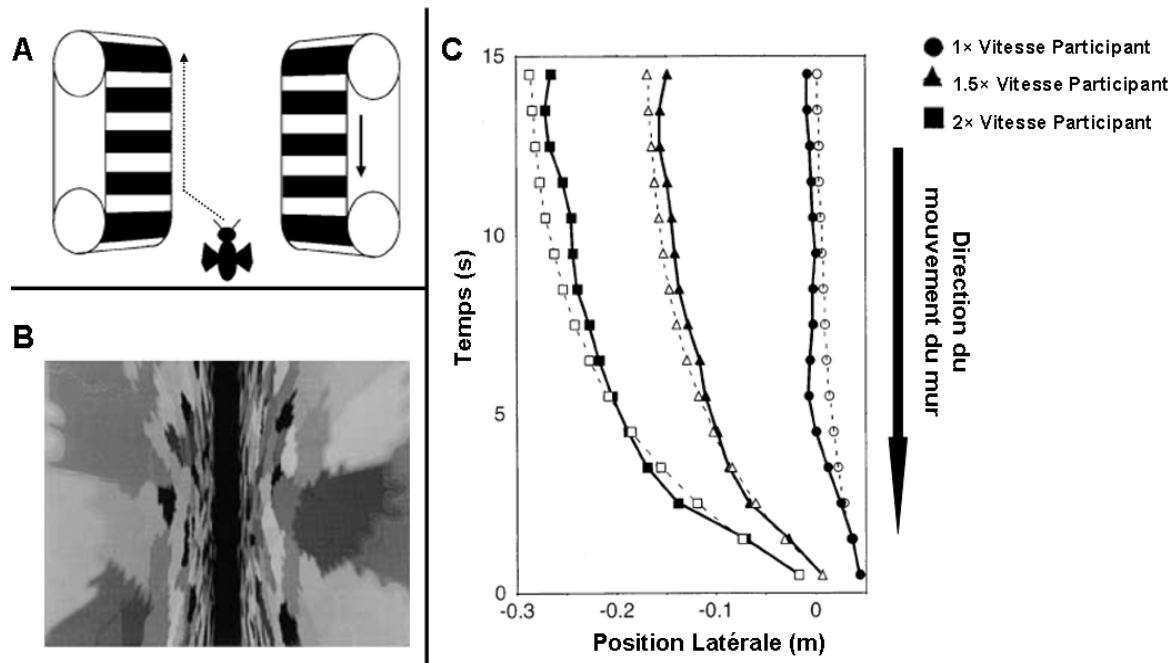


Figure 10 : Représentations des dispositifs expérimentaux utilisés par (A) Srinivasan et al. (1991) avec des abeilles et par (B) Duchon et Warren (2002) avec des humains, dans une tâche de déplacement dans un couloir. Les déplacements latéraux obtenus selon les différentes conditions de vitesse de mouvement du mur (●, ▲ et ■) sont représentées en (C) par des symboles pleins et noirs. Dans les mêmes conditions, les déplacements simulés sont représentés par les symboles vides et blancs (modifié d'après Duchon & Warren, 2002).

Ces résultats montrent clairement que des contraintes informationnelles identiques font appel chez différents agents au même principe de contrôle dans le cadre du contrôle de la direction de déplacement. La proposition d'une loi de contrôle modélisant cette stratégie d'égalisation des vitesses latérales optiques a permis à Duchon et Warren (2002) de rendre compte précisément du comportement des participants (symboles vides et blancs de la Figure 10C). De même, Duchon, Kaelbling et Warren (1998) ont implémenté cette stratégie dans un robot mobile et ils ont pu montrer la capacité d'un robot à naviguer dans un environnement méconnu en évitant des obstacles sur la seule base de ce principe de contrôle.

3.1.2. Couplage Perception-Actuation

Le deuxième niveau d'analyse du cycle Perception-Action (partie du bas de la Figure 9), se situe plutôt au niveau de l'agent. Bootsma (1998) le définit comme la manière avec laquelle l'information détectée est transformée en une dynamique comportementale. A ce niveau d'analyse, il y a une nécessité d'intégrer dans les lois de contrôle les contraintes neurophysiologiques, biomécaniques, anatomiques agissant au niveau du couplage Information-Mouvement. de Rugy, Taga, Montagne, Buekers et Laurent (2002) se sont intéressés à ce niveau d'analyse dans une tâche de pointage locomoteur. Les auteurs voulaient modéliser le comportement de régulation consistant pour le participant à faire tendre son comportement courant vers un comportement requis lui permettant de poser le pied sur une cible placée au sol. Les auteurs ont d'abord décrit l'information optique permettant le pointage de la cible, pour la relier ensuite à un paramètre du mouvement (i.e., la longueur de foulée). de Rugy et al. (2002) ont alors pris l'option d'intégrer dans la relation Information-Mouvement un modèle de locomotion bipédique humaine qui intègre des contraintes neurophysiologiques de la locomotion et de sa modulation (Taga, 1998). Le système musculo-squelettique de l'agent est intégré dans ce modèle sous la forme de huit segments qui caractérisent le système locomoteur d'un participant adulte et vingt muscles mono articulaires ou bi-articulaires (Figure 11).

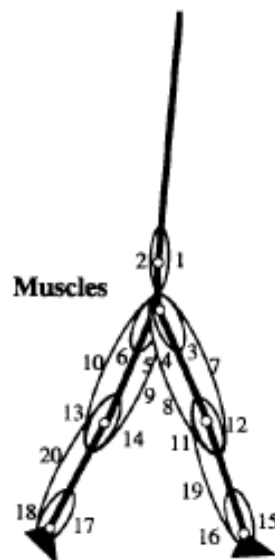


Figure 11 : Représentation des différentes articulations et des différents muscles qui constituent le système musculo-squelettique utilisé par de Rugy et al. (2002). Les auteurs ont intégré ce système dans la modélisation du couplage Perception-Actuation dans une tâche de pointage locomoteur. Ce modèle est composé de huit segments faisant intervenir vingt muscles (d'après de Rugy et al., 2002).

Les auteurs ont également intégré un système neuronal qui contient un générateur rythmique composé de sept paires d'oscillateurs neuronaux contrôlant chacune les mouvements d'une articulation. de Ruyg et al. (2002) ont donc proposé un modèle mettant en relation une information visuelle avec un paramètre du mouvement qui découle d'une intégration de contraintes neurophysiologiques précises. Les simulations prédites révèlent le caractère réaliste du modèle puisqu'elles permettent de reproduire des résultats basiques (préalablement observés expérimentalement) qui caractérisent le pointage locomoteur humain (de Ruyg, Montagne, Buekers, & Laurent, 2000a ; de Ruyg, Montagne, Buekers, & Laurent, 2000b ; Lee et al., 1982 ; Montagne et al., 2000).

Contrairement au caractère générique des lois de contrôle, ce niveau permet de rendre compte du comportement d'un agent particulier. Ce couplage perception-actuation revêt donc un caractère individuel. Toutefois, en intégrant des contraintes neurophysiologiques et des commandes motrices précises, ce niveau d'analyse permet une modélisation du comportement très pointue et une meilleure compréhension des mécanismes neurophysiologiques sous-jacents aux relations liant une variable informationnelle à un paramètre du mouvement.

En résumé, le choix du niveau d'analyse dépend grandement de la question posée par le chercheur. Si l'objectif recherché est de proposer la modélisation précise d'une fonction complète d'un agent particulier, alors le chercheur utilisera plutôt des modèles intégrant les contraintes neurophysiologiques au niveau perceptif et moteur (de Ruyg et al., 2002; Dessing, Peper, Bullock, & Beek, 2005). En revanche, si le chercheur a pour ambition de mettre en avant des principes généraux caractérisant des régulations comportementales produites par divers agents, alors il choisira plutôt le premier niveau d'analyse (Bastin, Craig, & Montagne, 2006b ; Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2004).

Nous avons choisi de situer cette thèse dans le cadre du premier niveau de modélisation (i.e., les lois de contrôle).

3.2. Expressions comportementales du couplage Information-Mouvement

L'effet devection linéaire permet d'illustrer la circularité entre information et mouvement. Lors d'un départ en gare, lorsque deux trains sont sur des rails voisins, alors que nous sommes assis à l'arrêt dans l'un des trains et que le second bouge à proximité, l'effet devection linéaire se traduit par le sentiment perceptif d'un déplacement de notre corps. La relation entre cet effet et des ajustements posturaux a été mise en évidence par Lee et Aronson (1974) en utilisant le paradigme de la chambre mobile. Alors que les participants étaient placés au milieu de la pièce, les expérimentateurs rapprochaient ou éloignaient les murs des participants. Lorsque le mur frontal était rapproché des participants, cela correspondait optiquement à un déplacement vers l'avant (i.e., un patron d'expansion optique) (Figure 12A). A l'inverse, l'éloignement du mur par rapport aux participants donnait l'impression d'un déplacement optique vers l'arrière (i.e., un patron de constriction optique) (Figure 12B). Ainsi, dans le cas d'un patron optique d'expansion (i.e., déplacement vers l'avant), si les participants perçoivent ce patron optique, ils devraient alors compenser la perception visuelle d'une chute vers l'avant en produisant un basculement postural vers l'arrière. A l'inverse, si les participants perçoivent le patron de constriction optique (i.e., un déplacement vers l'arrière), ils devraient alors compenser l'impression d'une chute vers l'arrière par un basculement postural vers l'avant.

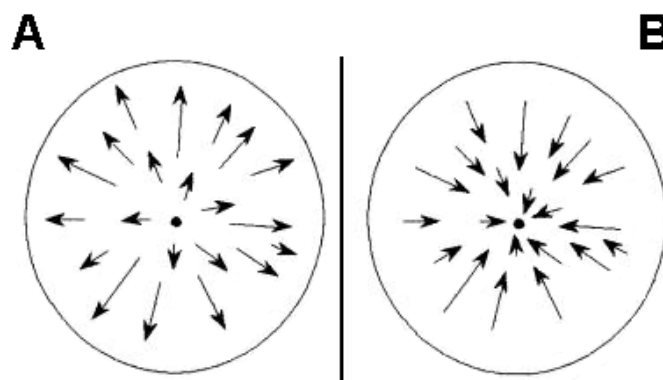


Figure 12 : Représentation schématique des patrons optiques obtenus lors d'oscillations dans le sens Antéro-Postérieur. (A) Le point représente le focus d'expansion optique qui correspond au point de fuite des vecteurs. Ce patron optique informe l'agent d'un mouvement vers l'avant. (B) Le point représente le focus de constriction qui représente le point de convergence des vecteurs. Ce patron optique informe l'agent d'un mouvement vers l'arrière.

Lee et Aronson (1974) ont rapporté que ces patrons optiques entraînent systématiquement des réponses posturales conformes aux prédictions.

Une expérience réalisée par Rieser, Pick, Ashmead et Garing (1995) a également mis en évidence cette influence respective et réciproque entre l'information et le mouvement dans une tâche locomotrice. Pour cela, Rieser et al. (1995) demandaient à des participants de marcher sur un tapis roulant, lui-même déplacé par un tracteur (Figure 13A). Dans une première condition, la vitesse du tapis roulant était plus lente que celle du tracteur, ce qui avait pour conséquence une vitesse optique résultante supérieure à celle obtenue en condition normale. Dans une deuxième condition, la vitesse du tapis roulant était plus rapide que celle du tracteur, ce qui entraînait une vitesse optique résultante inférieure à celle obtenue en condition normale. Après une exposition de 8 minutes aux conditions décrites ci-dessus, les participants devaient marcher (les yeux fermés) vers une cible fixe posée au sol. Les résultats obtenus montrent que les participants s'arrêtaient systématiquement avant la cible (graphique du bas de la Figure 13B) dans la condition où le déplacement entraînait une vitesse optique résultante supérieure (i.e., vitesse du tapis plus lente que celle du tracteur). A l'inverse, les participants dépassaient toujours la cible dans la condition où le déplacement donnait lieu à une vitesse optique résultante inférieure (i.e., vitesse du tapis plus rapide que celle du tracteur).

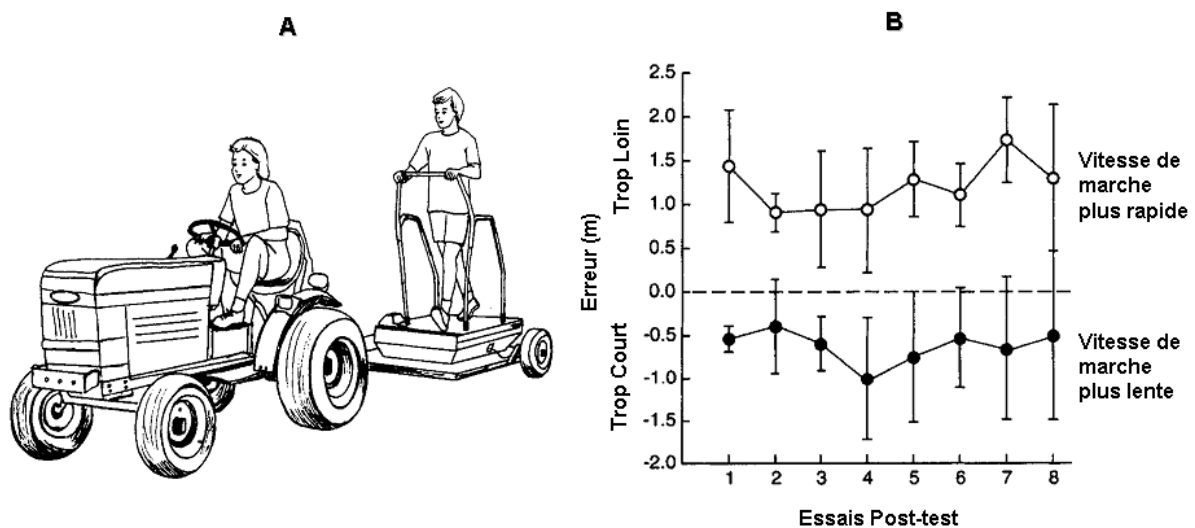


Figure 13: (A) Représentation schématique du dispositif utilisé. Un participant marchait sur un tapis roulant qui était tiré par un tracteur à une vitesse différente afin de fausser la vitesse optique du déplacement locomoteur. Après plusieurs minutes, il était demandé aux participants de marcher vers une cible les yeux fermés. (B) Les résultats de la tâche de pointage locomoteur montrent que les participants s'arrêtaient avant la cible (i.e., erreur négative) lorsque la vitesse du tapis roulant était plus lente que la vitesse du tracteur (graphique du bas). En revanche, lorsque la vitesse du tapis roulant était plus rapide que celle du tracteur, les participants dépassaient la cible (i.e., erreur positive) (modifié d'après Rieser et al., 1995).

Ces résultats montrent le caractère flexible du système perceptivo-moteur puisqu'après une exposition de 8 minutes, la relation Information-Mouvement a pu être modifiée et entraîner une erreur de pointage systématique.

3.3. Les Loïs de contrôle

Une fois que la sensibilité des agents aux informations est mise en évidence, il convient de modéliser les comportements de régulation produits sur la base d'une information précise afin d'aller au bout de la démonstration de la mise en œuvre du couplage Information-Mouvement. A ce stade, nous nous intéressons dans le détail au concept de loi de contrôle défini par Warren (1988).

3.3.1. Définition, fonctionnement et caractéristiques des lois de contrôle

Les lois de contrôle correspondent au premier niveau d'analyse du couplage Perception-Action (i.e., « le couplage Information-Mouvement »). Ces lois de contrôle peuvent être définies comme la formalisation mathématique de la relation circulaire qui lie une information à un paramètre du mouvement. Ces lois de contrôle visent à expliquer, par des principes simples, des régularités observées au niveau comportemental en mettant en relation une information et un paramètre du mouvement. Les lois de contrôle révèlent donc la manière avec laquelle un paramètre du mouvement impliqué dans l'action est modulé par l'information, pour donner lieu à un mouvement adapté (Warren, 1988). Elles relient les forces produites par l'agent à l'information perceptive sous la forme suivante :

$$\text{Forces} = g(\text{Information}) \quad (\text{Equation 4})$$

avec à gauche, les forces à produire pour modifier le comportement; à droite l'information contenue dans le flux optique qui renseigne l'agent sur l'état courant du système Agent-Environnement.

Il est à noter que l'information dont il est question ici est une information qui réduit le nombre de degrés de liberté perceptifs à gérer, tout en spécifiant la propriété à même de caractériser l'état du système Agent-Environnement. De la même manière, en contrôlant uniquement un paramètre du mouvement global (i.e., une force), la loi de contrôle (Equation 4) permet une réduction du nombre de degrés de liberté du système moteur de l'agent. Ainsi, la loi de contrôle permet, par la simple mise en relation d'une information et d'une force, de procéder aux régulations requises pour réussir la tâche. Ces lois de contrôle revêtent un

caractère généralisable dès lors que les agents possèdent des systèmes perceptifs leur permettant de percevoir la même information (e.g., Duchon & Warren, 2002).

La première loi de contrôle a été définie par Warren, Young et Lee (1986) dans une tâche de pointage locomoteur. Il était demandé aux participants de courir sur un tapis roulant et de moduler les longueurs de foulée de manière à pointer les cibles projetées aléatoirement sur la bande roulante du tapis roulant. Selon les auteurs, il suffit aux participants de mettre en œuvre la loi de contrôle qui relie de manière continue l'impulsion verticale de la foulée (i.e., la force) avec l'intervalle temporel (défini optiquement par un différentiel de *tau*, cf., paragraphe 1.2.3) séparant deux cibles successives (Figure 14).

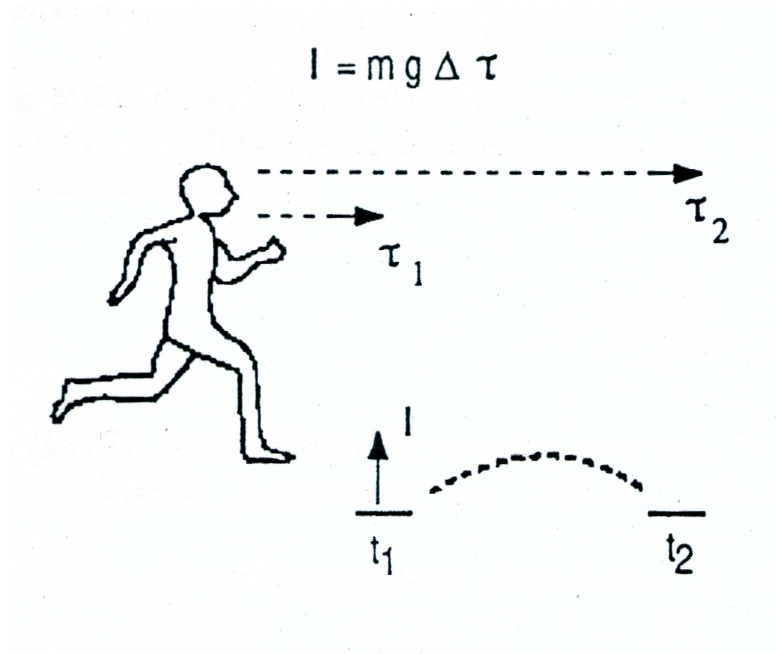


Figure 14 : Illustration de la loi de contrôle proposée par Warren et al. (1986) pour expliquer le contrôle de pointages locomoteurs successifs. D'après cette loi de contrôle, l'impulsion verticale (*I*) est fonction du différentiel de *tau* ($\tau_2 - \tau_1$) référé à deux cibles successives (d'après Warren, 1988).

Plus précisément, le différentiel de *tau* référé à deux cibles successives permet d'avoir accès à l'intervalle temporel de premier ordre correspondant à la durée de la foulée requise pour poser le pied sur les cibles. L'utilisation de la loi de contrôle de Warren et al. (1986) consiste donc pour les participants à moduler l'impulsion verticale afin de faire correspondre la durée de la foulée courante avec la durée de la foulée requise (spécifiée par le différentiel de *tau*). La loi de contrôle proposée prend la forme suivante :

$$I = mg \times \Delta \tau \quad (\text{Equation 5})$$

où I représente l'impulsion verticale, m correspond à la masse de l'agent, g est l'accélération gravitaire terrestre, et $\Delta \tau$ correspond au différentiel de τ entre les deux cibles.

Ainsi, la force représentée par l'impulsion verticale est bien liée à une information ($\Delta \tau$) et est modulée uniquement par la masse de l'agent et la force d'attraction gravitaire. Les résultats obtenus par Warren et al. (1986) indiquent que cette loi de contrôle permet d'expliquer 97% de la variance de la durée des foulées produites par les participants.

Depuis cette première proposition, d'autres lois de contrôle ont été présentées dans des tâches d'interception de mobile notamment (Bastin et al., 2006b; Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2005; Fajen & Warren, 2007). Warren (1998, 2006) a proposé par la suite de considérer à la fois la dynamique liée aux agents et la dynamique liée à l'environnement. Ainsi, le comportement résulte à la fois de l'état courant du système d'action et de l'environnement, tous deux étant considérés comme des systèmes dynamiques couplés. Sans que cela implique un changement de niveau d'analyse (i.e., intégrer précisément les contraintes neurophysiologiques et musculo-squelettiques), le simple fait d'ajouter à la loi de contrôle (Equation 6) un terme d'amortissement, qui prend en compte les dynamiques intrinsèques du système locomoteur, permettrait de rendre compte du comportement de différents agents. L'architecture de la loi de contrôle utilisée dans les expériences réalisées au cours de cette thèse prend alors la forme suivante :

$$Forces = \alpha (\psi \times I) + \beta \dot{Y} \quad (\text{Equation 6})$$

avec à gauche les forces à produire par l'agent pour réguler son comportement en fonction de l'information (I), à droite, ψ est une fonction d'activation qui prend en compte le temps nécessaire à la détection de l'information par l'agent, $\dot{Y}$ est la vitesse de déplacement des participants et correspond à un terme d'amortissement, α est une constante qui module la force du couplage entre l'information et le mouvement, et β est une constante qui module la force de du terme d'amortissement.

Tout en conservant l'architecture d'une loi de contrôle mettant en relation l'information avec un paramètre du mouvement, l'ajout d'un terme d'amortissement qui capture les caractéristiques dynamiques du système locomoteur de l'agent fournit une loi de contrôle généralisable à différents agents. De plus, la fonction d'activation (ψ) qui prend en compte le temps nécessaire à l'agent pour détecter l'information et initier son mouvement permet de saisir plus précisément le comportement réel.

Ce travail de thèse s'est intéressé précisément à ce type de lois de contrôle pour essayer de rendre compte du comportement de régulation produit par différentes populations dans des tâches d'interception.

3.3.2. Les tâches d'interception

Voici maintenant des exemples de ce type de lois de contrôle qui ont été mises en évidence dans des tâches d'interception. Nous distinguerons les interceptions réalisées par un agent stationnaire de celles réalisées par un agent en mouvement.

3.3.2.1. La loi de contrôle Vitesse Requise

Cette loi de contrôle (Vitesse Requise) a été formulée à l'origine par Peper, Bootsma, Mestre et Bakker (1994) dans le cadre de l'interception d'un objet mobile par un agent stationnaire. La tâche consistait en une capture de balle uni-manuelle dans laquelle le déplacement de la main était contraint mécaniquement selon un axe transversal (Figure 15).

La loi de contrôle Vitesse Requise reformulée ensuite par Bootsma, Fayt, Zaal et Laurent (1997)(Equation 7) permet à l'agent engagé dans une tâche de capture de balle uni-manuelle de contrôler l'accélération de la main sur la base d'un différentiel de vitesse spécifié optiquement (Laurent, Montagne & Durey, 1996).

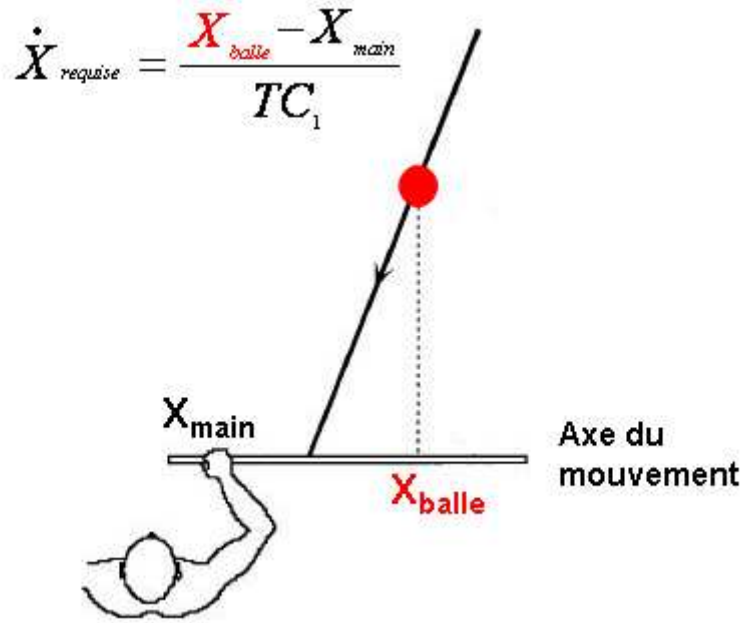


Figure 15 : Représentation schématique d'une tâche de capture de balle uni-manuelle dans laquelle le mouvement de la main est contraint selon un axe de mouvement transversal. Selon Peper et al. (1994), les participants régulent la vitesse de leur main afin d'atteindre la Vitesse Requise de la main ($\dot{X}_{requis}$) qui peut être définie comme le rapport entre la distance séparant la position courante de la main (X_{main}) et la projection orthogonale de la balle sur l'axe de mouvement (X_{balle}), et le temps restant avant le contact entre la balle et la main (TC_1) (modifié d'après Montagne, Laurent, Durey, & Bootsma, 1999).

Ce différentiel de vitesse est composé de la vitesse requise de la main (Figure 15) et de la vitesse courante de la main. Cette loi de contrôle Vitesse Requise (RV) met donc en relation un paramètre du mouvement (l'accélération de la main) avec une information correspondant à un différentiel de vitesse (Vitesse Requise de la main – Vitesse courante de la main) disponible dans le flux optique local. La loi de contrôle RV proposée prend donc la forme suivante :

$$\ddot{X}_{main} = \alpha \dot{X}_{requis} - \beta \dot{X}_{main} \quad (\text{Equation 7})$$

avec

$$\dot{X}_{requis} = \frac{X_{balle} - X_{main}}{TC_1} \quad (\text{Equation 8})$$

où $\ddot{X}_{main}$ représente l'accélération de la main, $\dot{X}_{requis}$ correspond à la vitesse requise de la main, $\dot{X}_{main}$ correspond à la vitesse courante de la main, X_{balle} correspond à la projection orthogonale de la balle sur l'axe de mouvement, X_{main} correspond à la position latérale de la main, et α et β sont des constantes.

Cette loi de contrôle RV consiste donc pour l'agent engagé dans une tâche de capture de balle uni-manuelle, à moduler l'accélération de sa main de sorte que la vitesse courante de la main tende vers la Vitesse Requise. La Vitesse Requise correspond à la vitesse vers laquelle l'agent doit tendre pour intercepter l'objet. Ainsi, dès l'instant où la relation entre la position de la main et la position de la balle est modifiée (par le biais d'un changement de vitesse de la balle ou de la main, ou encore d'une combinaison des deux), la Vitesse Requise est également modifiée. Il se crée ainsi un décalage entre la Vitesse Requise et la vitesse courante de la main qui va renseigner l'agent sur l'action à entreprendre pour annuler cette différence entre les deux vitesses. Par exemple, dans le cas où le différentiel vient à s'accroître, cela signifie que la Vitesse Requise est plus importante que la vitesse actuelle de la main. L'agent devra alors modifier l'accélération de sa main afin de tendre vers la nouvelle Vitesse Requise et par conséquent faire tendre le différentiel vers zéro.

Certains auteurs ont testé cette loi de contrôle en manipulant les contraintes de la tâche de manière à induire expérimentalement un décalage entre le comportement requis et le comportement courant. Montagne et al. (1999) par exemple ont choisi de manipuler la vitesse requise en maniant conjointement la position de départ de la main et l'angle d'approche de la balle (Figure 16A).

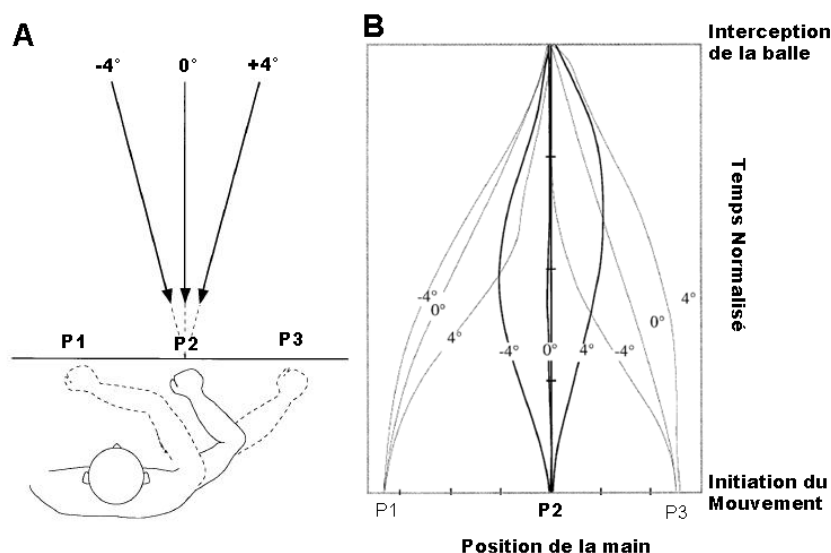


Figure 16 : (A) Illustration des différentes manipulations expérimentales permettant d'induire un décalage entre le comportement requis et le comportement courant. Montagne et al. (1999) ont proposé trois positions initiales de la main correspondant à un placement à gauche du point d'interception (P1), au point d'interception (P2) et à droite du point d'interception (P3). De plus, la balle pouvait approcher selon différents angles (-4° , 0° ou $+4^\circ$). (B) Représentation des positions latérales de la main obtenues dans les différentes conditions expérimentales. Les résultats montrent un patron de régulation de la position de la main différent dans chaque condition (modifié d'après Montagne et al., 1999).

Selon le modèle Vitesse Requisite, chaque condition expérimentale doit donner lieu à des profils cinématiques de la main différents puisque le patron d'évolution du comportement requis n'est jamais identique. La position de la main placée initialement au point d'observation (P2) à l'insu du sujet est une condition expérimentale particulièrement intéressante. En effet, alors qu'aucune régulation comportementale n'est nécessaire de la part du participant (i.e., le maintien de la main immobile permet de réussir la tâche), le modèle Vitesse Requisite prédit un mouvement de la main. Dans le cas d'un angle d'approche négatif (Figure 16A), la projection orthogonale de la balle étant située à gauche de la main (position P2), le modèle Vitesse Requisite prédit un mouvement de la main vers la gauche, puis un mouvement de rebroussement vers la droite afin d'annuler la distance balle-main latérale. Dans la condition miroir (Figure 16A), le modèle Vitesse Requisite prédit un patron cinématique opposé donnant lieu à un mouvement de la main vers la droite suivi d'un mouvement de la main vers la gauche. Les résultats obtenus par Montagne et al. (1999) confirment les prédictions faites sur la base du modèle Vitesse Requisite (Figure 16B). En effet, dans chaque condition expérimentale les participants produisent un patron de régulation de la position de la main différent. De plus, même lorsque les participants ont la main placée au futur lieu d'arrivée de la balle, conformément aux prédictions faites, ils produisent un mouvement d'aller-retour de la main sur l'axe de déplacement (courbes en gras de la Figure 16). Ces résultats semblent confirmer l'utilisation du différentiel de vitesse comme information pour réguler l'action d'interception. Dans une autre étude réalisée ultérieurement (Montagne, Fraise, Ripoll, & Laurent, 2000), le modèle Vitesse Requisite a également reçu des preuves empiriques de sa mise en œuvre puisque les auteurs ont montré que des trajectoires différentes mais donnant lieu à des vitesses requises similaires induisent des mouvements d'interception identiques.

Depuis qu'elle a été proposée par Peper et al. (1994), même si de nombreuses études ont amené des preuves expérimentales de la mise en œuvre de la loi de contrôle Vitesse Requisite dans des tâches de capture de balle par un agent stationnaire (Arzamarski, Harrison, Hajnal, & Michaels, 2007; Bootsma et al., 1997; Jacobs & Michaels, 2006; Michaels, Jacobs, & Bongers, 2006 ; Montagne et; 1999); ces études mènent encore à ce jour un débat sur les variables optiques qui seraient utilisées pour accéder à la Vitesse Requisite et mettre en œuvre cette loi de contrôle.

Ce modèle (Equation 8) peut théoriquement être étendu à des activités plus naturelles dans lesquelles le déplacement du mobile et de l'agent ne seraient pas contraints. Pourtant, à ce jour, très peu d'études s'y sont intéressées. La première étude a été réalisée par Chardenon, Montagne, Buekers et Laurent (2002) dans le cadre d'interceptions de mobiles induisant un déplacement locomoteur. Pour tester le modèle vitesse requise, tout en gardant la même architecture, les auteurs ont simplement reformulé le modèle en prenant en compte la projection orthogonale de la balle sur l'axe de déplacement de l'agent (Figure 17) :

$$\ddot{Y} = \alpha \dot{Y}_{requis} - \beta \dot{Y}_{agent} \quad (\text{Equation 9})$$

où

$$\dot{Y}_{requis} = (Y_{balle} - Y_{agent}) / TC_1 \quad (\text{Equation 10})$$

dans lesquelles, $\ddot{Y}$ représente l'accélération de l'agent, $\dot{Y}_{sujet}$ correspond à la vitesse de l'agent, $\dot{Y}_{requis}$ correspond à la distance séparant la balle du participant divisé par le temps de pré-contact de premier ordre (TC_1), et α et β représentent des constantes.

La vitesse requise dépend alors de la distance séparant la position courante du participant et la projection orthogonale de la balle sur son axe de déplacement ($Y_{balle} - Y_{agent}$), divisé par le temps restant avant le franchissement de l'axe de déplacement du participant par la balle (TC_1). Chardenon et al. (2002) ont voulu tester la capacité de ce modèle Vitesse Requise à rendre compte des régulations comportementales produites dans des tâches d'interception avec déplacement. Les auteurs ont demandé aux participants de se déplacer de manière à intercepter la balle avec la tête lorsque celle-ci croisait l'axe de déplacement (axe Y sur la Figure 17). Ils ont utilisé un dispositif de réalité virtuelle permettant d'asservir les déplacements de l'environnement virtuel aux déplacements des participants sur un tapis roulant.

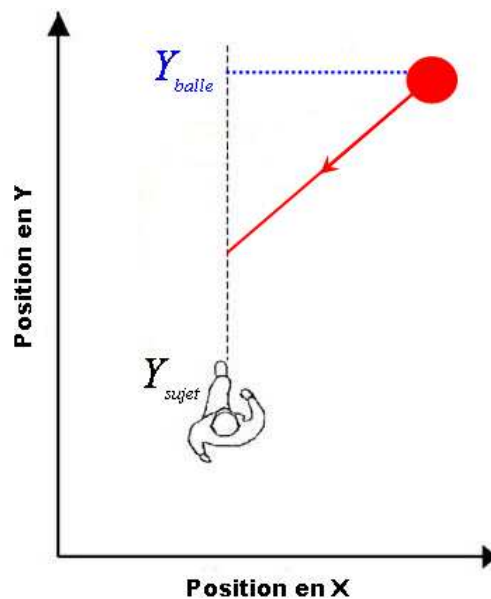


Figure 17 : Vue aérienne de la tâche d'interception utilisée par Chardenon et al. (2002). Le sujet doit intercepter une balle mobile en produisant un déplacement vers l'avant le long de l'axe Y. Le modèle vitesse requise reformulé par Chardenon et al. (2002) prend en compte la projection orthogonale de la balle sur l'axe de déplacement du participant (Y_{balle}). La vitesse requise repose alors sur la distance séparant la position courante du sujet et la projection orthogonale de la balle, divisée par le temps restant avant le franchissement de l'axe de déplacement par la balle.

Afin d'induire des régulations comportementales, Chardenon et al. (2002) ont proposé trois conditions expérimentales distinctes. Dans la première, aucune régulation comportementale n'était nécessaire puisque le maintien de la vitesse initiale permettait la réussite de la tâche. En revanche, dans les deux autres conditions, les participants devaient accélérer ou décélérer, sans quoi le maintien de la vitesse initiale entraînait respectivement un franchissement de la balle 1m devant ou 1m derrière le participant. Les résultats obtenus montrent que le modèle Vitesse Requise permet de prédire uniquement les régulations motrices produites au voisinage du contact (i.e., dans la dernière seconde). En revanche, Chardenon et al. (2002) ont montré que la loi de contrôle reposant sur la prise en compte du taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$) est plus à même de prédire les régulations motrices produites dans ce type d'interception.

En résumé, les résultats de ces études suggèrent que les lois de contrôle sont spécifiques à la tâche réalisée. Dans une tâche de capture de balle qui nécessite le positionnement de la main au point d'interception, le modèle Vitesse Requise est le plus approprié pour contrôler l'action. En revanche, dans une tâche d'interception qui nécessite de déplacer son corps au point d'interception, la loi de contrôle prenant en compte $\dot{\theta}$ semble être plus adaptée pour contrôler son déplacement jusqu'au point d'interception.

3.3.2.2. La loi de contrôle ‘maintien de l’angle de relèvement constant’ (CBA)

3.3.2.2.1. Dispositif expérimental utilisé pour tester la loi de contrôle CBA

Toutes les études qui seront présentées par la suite ont fait usage du même type de dispositif expérimental que nous avons également utilisé au cours de cette thèse. Il s’agit d’un dispositif de réalité virtuelle composé d’un environnement virtuel type qui comprend un plan porteur, une balle et une ligne matérialisant l’axe de déplacement des participants (Figure 18B) et projeté sur un grand écran placé devant le sujet (Figure 18A). De plus, le tapis roulant était couplé à l’environnement de telle sorte que les déplacements de l’environnement virtuel dépendaient de ceux produits par les participants sur le tapis roulant.

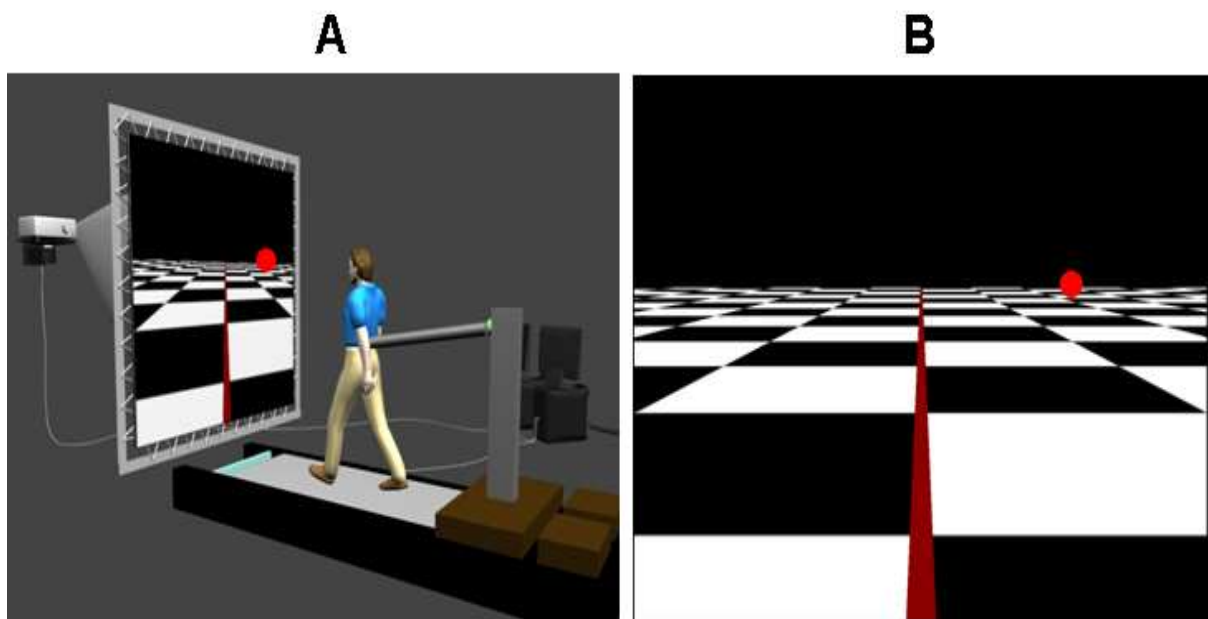


Figure 18: Illustration du dispositif de réalité virtuelle utilisé dans les études présentées par la suite. (A) Le dispositif était constitué d’un tapis roulant relié à l’environnement de telle sorte que les déplacements de l’environnement soient dépendants de ceux produits par le participant. (B) Exemple du type d’environnement virtuel utilisé, composé d’un plan porteur texturé, d’une balle et d’une ligne matérialisant l’axe de déplacement du participant.

Ce dispositif de réalité virtuelle permettait une interaction complète entre l’agent et l’environnement virtuel. De plus, afin d’obtenir un patron de marche réaliste et fiable, les expérimentateurs ajustaient la vitesse initiale du tapis roulant pour permettre aux participants de surmonter l’inertie produite par les forces de friction exercées sur le tapis roulant.

3.3.3.2.2. *Présentation de l'information prise en compte et de la variable d'offset*

Dans ces situations d'interception de mobiles dont la trajectoire est contenue uniquement sur un plan horizontal, Chapman (1968) a proposé un candidat informationnel permettant à l'agent de contrôler son action : le taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$). L'angle de relèvement (θ) peut être défini comme l'angle sous-tendu au point d'observation par la position de la balle et la direction de déplacement du participant (Figure 19) et est calculé par l'équation suivante :

$$\theta = \arctan((X_{balle} - X_{agent}) / (Y_{balle} - Y_{agent})) \quad (\text{Equation 11})$$

avec X_{balle} et X_{agent} correspondant respectivement aux positions latérales de la balle et de l'agent, et Y_{balle} et Y_{agent} correspondant respectivement aux positions dans la profondeur de la balle et de l'agent.

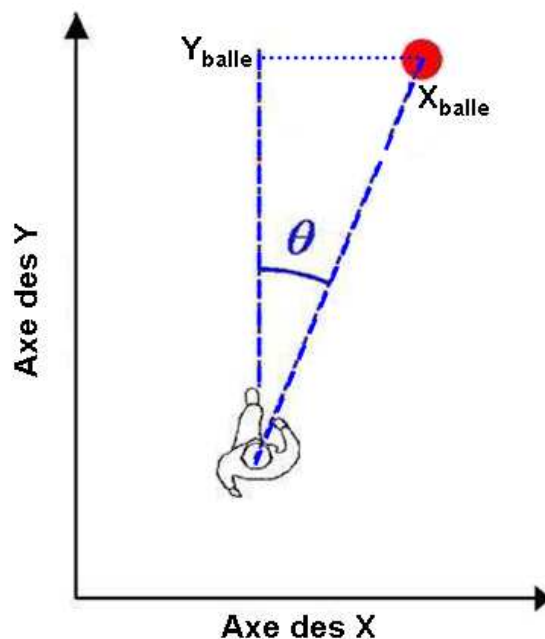


Figure 19 : Vue aérienne de l'angle de relèvement correspondant à l'angle sous-tendu au point d'observation par la position angulaire de la balle et la direction de déplacement de l'agent.

Selon une règle empirique bien connue des navigateurs, si un autre bateau se rapproche (i.e., crée un patron d'expansion optique) et garde le même cap (i.e., un angle de relèvement constant), alors les deux bateaux sont sur une trajectoire de collision et des changements de cap (i.e., des changements d'angle de relèvement) ou de direction sont nécessaires pour éviter

la collision (Pollack, 1995). Quelques années plus tard, plusieurs études se sont intéressées à la possible utilisation de l'angle de relèvement par des participants pour contrôler leur action d'interception (Lenoir et al., 1999a; Lenoir et al., 1999b ; Lenoir, Musch, Thiery, & Savelsbergh, 2002). Dans toutes ces études, les auteurs demandaient aux participants de produire un déplacement (contraint sur un axe) afin d'intercepter une balle mobile lorsque celle-ci croisait leurs trajectoires. Les résultats obtenus par Lenoir et al. (1999a) montrent que les participants produisent des régulations comportementales visant à annuler les changements de l'angle de relèvement. Pour induire des changements de cet angle, la majorité des études présentées par la suite ont utilisé, entre autres manipulations, plusieurs points de départ de la balle dans l'axe de la profondeur (i.e., l'axe Y sur la Figure 20), entraînant ainsi des points d'interception différents. Cette manipulation correspond à la variable (indépendante) 'offset' et permet d'induire des régulations cinématiques spécifiques. Prenons le cas d'un agent souhaitant intercepter une balle dont la vitesse et la trajectoire restent inchangées (Figure 20A). L'illustration montre très clairement que les trajectoires de la balle et du participant se croisent au même moment et au même endroit si l'angle de relèvement (θ) reste constant. Le taux de changement de l'angle de relèvement reste alors nul au cours de l'interception (ligne pleine noire de la Figure 20E) et garantit au participant le succès de l'interception. La stratégie prenant en compte le taux de changement de l'angle de relèvement (CBA) consiste donc à moduler son comportement de manière à annuler les changements angulaires (i.e., faire en sorte que $\dot{\theta} = 0$).

Afin d'induire des régulations comportementales, les auteurs utilisaient trois conditions d'offset qui plaçaient les participants dans les trois situations présentées sur la Figure 20. Dans le cas d'un offset nul, (Figure 20A), aucune régulation n'est nécessaire car le maintien de la vitesse initiale entraîne un taux de changement de l'angle de relèvement nul (ligne pleine noire de la Figure 20E).

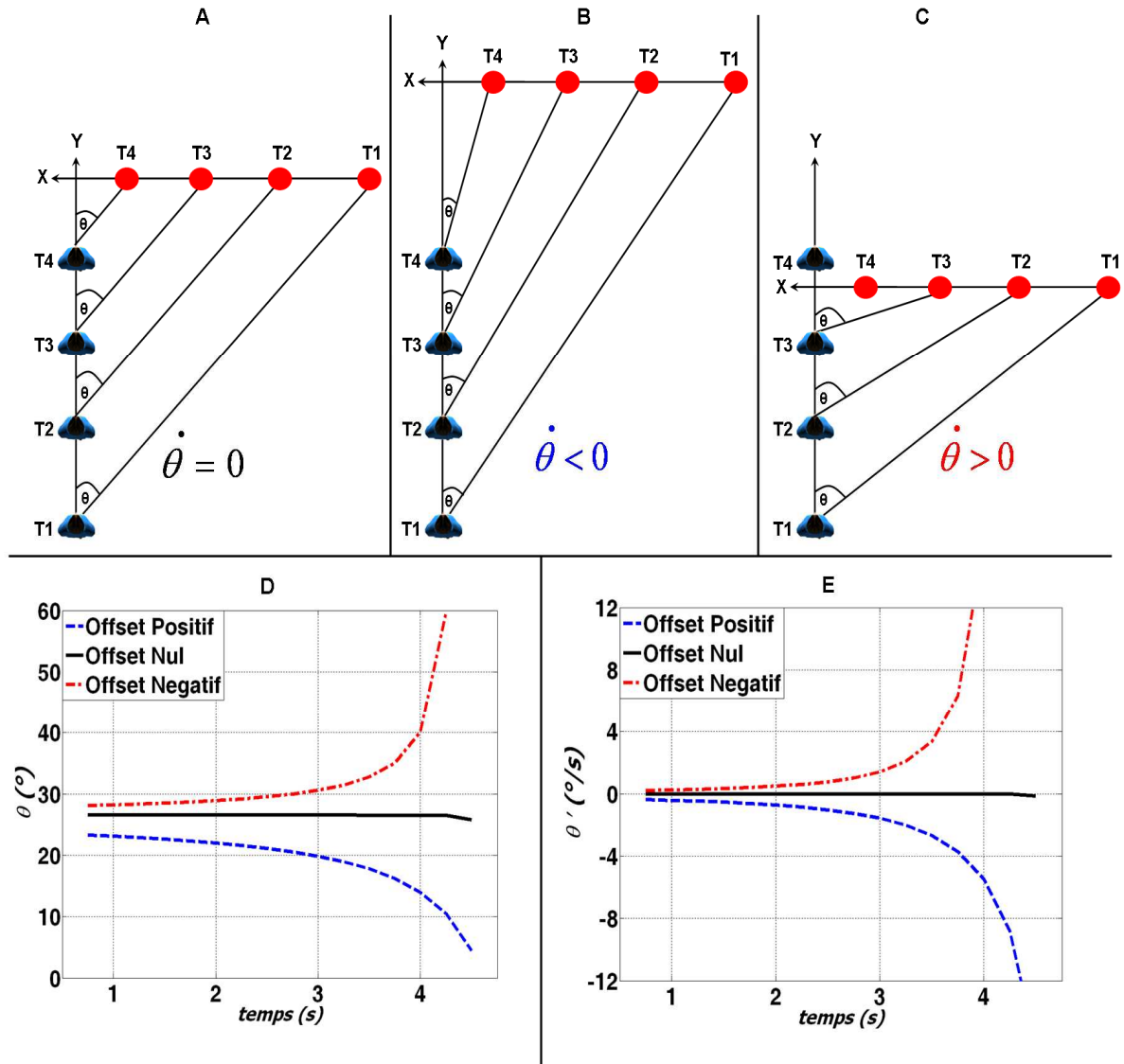


Figure 20 : Représentation schématique, en fonction de l'offset, du taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$) au cours d'une tâche d'interception locomotrice dans laquelle l'agent se déplace selon l'axe Y et la balle selon l'axe des X. (A) Illustration de l'offset nul pour lequel l'agent et la balle ont une vitesse initiale (T1 à T2) qui maintient θ constant. Le taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$) est donc nul et informe l'agent qu'un maintien de sa vitesse lui assurera l'interception. (B) Illustration de l'offset positif pour lequel l'agent est en retard sur la balle, entraînant un taux de changement de l'angle de relèvement négatif (i.e., une diminution de θ). (C) Illustration de l'offset négatif où l'agent est en avance sur la balle, entraînant alors un taux de changement de l'angle de relèvement positif (i.e., une augmentation de θ). (D) Représentation de l'évolution de l'angle de relèvement dans les différents offsets pour un participant qui maintient sa vitesse initiale constante tout au long de l'interception. Dans le cas d'un offset positif (ligne bleue en traits d'union), la courbe montre clairement une augmentation de θ . A l'inverse, pour un offset négatif (ligne rouge en pointillés), l'angle de relèvement augmente tandis qu'il reste constant pour un offset nul (ligne noire pleine). Les mêmes profils sont observés pour le taux de changement de l'angle de relèvement (E).

En revanche, dans le cas d'un offset positif (Figure 20B), les participants ont une vitesse insuffisante ce qui entraîne une diminution de l'angle de relèvement et un taux de changement négatif (lignes pointillés bleues de la Figure 20D et E, respectivement). A l'inverse, dans la

condition d'offset négatif, les participants se déplacent trop vite avec comme conséquence une augmentation de l'angle de relèvement et un taux de changement positif (lignes pointillées rouges de la Figure 20D et E, respectivement).

Ainsi, à partir de ces différentes conditions d'offset, si les participants utilisent la loi de contrôle CBA ils devraient produire une accélération, une décélération ou maintenir la vitesse inchangée dans les conditions d'offset positif, négatif ou nul, respectivement. Par conséquent, sur la base du taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$), l'agent est informé sur la nature des régulations à produire (i.e., accélérer, décélérer ou maintenir sa vitesse) ainsi que sur la quantité de régulation à produire afin de maintenir le taux de changement de l'angle de relèvement nul. Cette stratégie, appelée Constant Bearing Angle (CBA), a reçu un certain nombre de validations empiriques de son utilisation dans le contrôle d'action d'interception aussi bien chez les humains (Bastin et al., 2006b; Lenoir et al., 2002) que chez les animaux (Lanchester & Mark, 1975; Olberg, Worthington, & Venator, 2000).

Cependant, il est à noter que dans la Figure 20 le déplacement de l'agent est contraint sur un seul axe, de telle sorte que l'agent peut seulement moduler son accélération pour annuler le taux de changement de l'angle de relèvement. Or, dans des situations naturelles, l'agent a également la possibilité de modifier sa direction de déplacement. Ainsi, dans le cas où l'agent doit accélérer pour annuler $\dot{\theta}$ (Figure 20B), il lui est également possible de tourner dans la direction de mouvement de la cible (i.e., s'éloigner d'elle). De la même manière, dans le cas où l'agent est en avance sur la balle (Figure 20C), plutôt que de décélérer l'agent a la possibilité de tourner vers la balle (i.e., se rapprocher) pour annuler $\dot{\theta}$. Bien que le travail de cette thèse porte exclusivement sur les interceptions dans lesquelles le déplacement des agents était contraint sur un axe, Lenoir et al. (2002) montrent que lorsque des agents peuvent courir librement pour intercepter une balle, ils se déplacent de manière à annuler également le taux de changement de l'angle de relèvement. Ces résultats ont été confirmés plus tard par Fajen et Warren (2004, 2007) dans une tâche consistant à marcher vers une cible mobile.

La loi de contrôle sur laquelle porte cette thèse relie donc l'accélération avec le taux de changement de l'angle de relèvement et prend la forme suivante (Bastin et al., 2006b) :

$$\ddot{Y} = k_1(\psi \times \dot{\theta}) + k_2 \times \dot{Y} \quad (\text{Equation 12})$$

où $\ddot{Y}$ est l'accélération des participants, ψ est une fonction d'activation, $\dot{\theta}$ est le taux de changement de l'angle de relèvement, $\dot{Y}$ est la vitesse de déplacement des participants correspondant à un terme d'amortissement, k_1 est une constante qui module la force du couplage entre l'information et le mouvement, et k_2 est une constante qui module la force du terme d'amortissement.

Cette loi de contrôle CBA relie donc une information (le taux de changement de l'angle de relèvement) à un paramètre du mouvement (l'accélération) tout en prenant en compte la dynamique du système locomoteur de l'agent. Le prochain paragraphe consiste à présenter, à travers différentes études, quelles sont les différentes manipulations expérimentales qui ont permis de manipuler précisément l'information ($\dot{\theta}$) et ainsi tester la mise en œuvre de cette loi de contrôle CBA.

3.3.3.2.3. *Manipuler l'information en modifiant le déplacement du mobile.*

Chardenon et al. (2005) ont voulu savoir si la loi de contrôle CBA pouvait permettre à des agents de contrôler leur action d'interception malgré des contraintes environnementales changeantes. Pour cela les auteurs ont proposé deux expériences dans lesquelles ils manipulaient soit l'angle d'approche, soit la vitesse de la balle à l'intérieur de chaque essai.

Dans la première expérience, les auteurs ont proposé trois angles d'approche différents (fermé (15°), moyen (45°) et ouvert (75°), Figure 21). L'angle d'approche correspond à l'angle formé entre l'axe de déplacement des participants et la trajectoire suivie par les balles (traits en pointillés noirs et blancs de la Figure 21). Ces angles d'approche donnaient lieu à différentes trajectoires rectilignes qui induisent des taux de changement de l'angle de relèvement différents de telle sorte que, pour un déplacement donné de l'agent, plus l'angle d'approche est ouvert, plus le taux de changement de l'angle de relèvement est important.

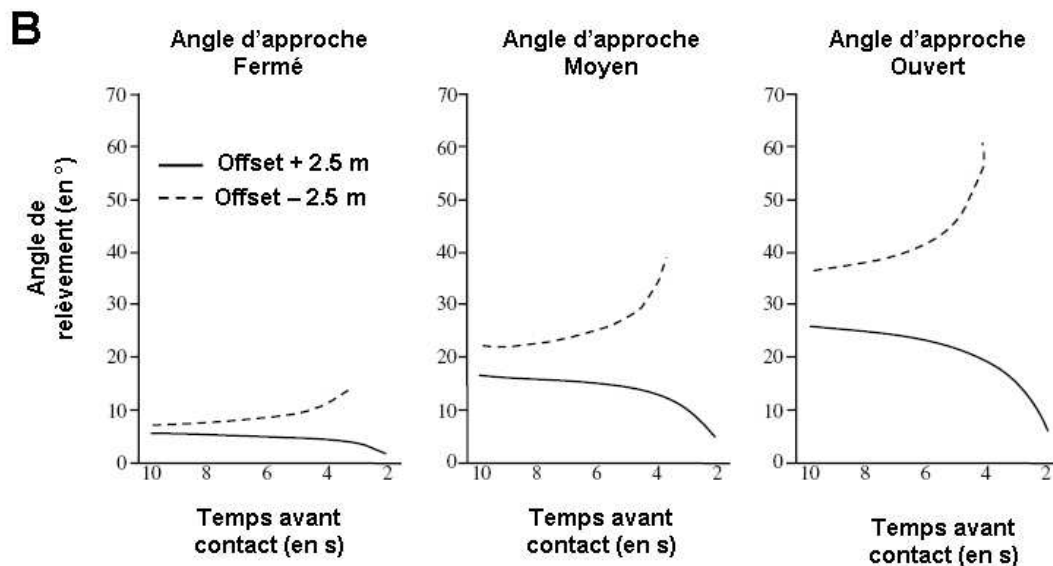
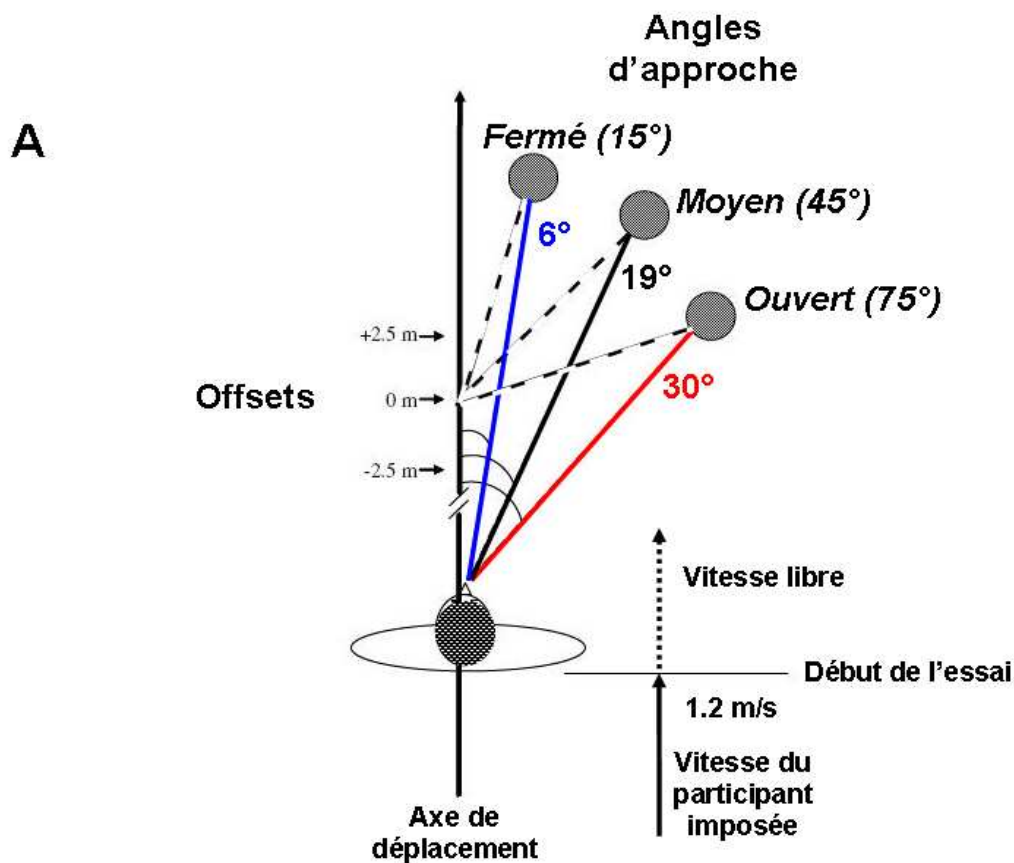


Figure 21: (A) Vue du dessus des différentes manipulations expérimentales de l'expérience 1 de Chardenon et al. (2005). Les auteurs ont proposé trois offsets (+2.5m, 0m et -2.5m). Pour chaque offset, les balles suivaient une trajectoire qui présentait un angle d'approche fermé (15°), moyen (45°) ou ouvert (75°) donnant lieu à trois angles de relèvement différents (6°, 19° et 30°, respectivement). L'angle d'approche correspond à l'angle formé entre l'axe de déplacement du participant et la trajectoire de la balle (traits en pointillés noirs et blancs). (B) Simulation, pour les conditions d'offset +2.5m et -2.5m, de l'évolution de l'angle de relèvement si le participant maintient sa vitesse initiale constante selon les différents angles d'approche (modifié d'après Chardenon et al., 2005).

Conformément au principe de fonctionnement de la loi de contrôle CBA (cf., Equation 12) dans différentes conditions d'offset (Figure 20), les simulations faites par les auteurs dans le cas d'un maintien de la vitesse initiale (lignes en pointillés et pleines de la Figure 21B) montrent des changements angulaires opposés selon l'offset. De plus, ces changements angulaires sont d'autant plus rapides et marqués que l'angle d'approche est ouvert (panneaux de gauche à droite de la Figure 21B, respectivement). Les auteurs s'attendaient donc à des régulations comportementales plus précoces et plus importantes dans la condition d'angle d'approche ouvert (panneau de droite de la Figure 21B). A l'opposé, le taux de changement de l'angle étant plus faible avec un angle d'approche fermé, Chardenon et al. (2005) prédisaient des régulations motrices plus tardives et moins prononcées (panneau de gauche de la Figure 21B).

Les résultats obtenus sur la vitesse de déplacement produite par les participants confirment les prédictions énoncées ci-dessus et vont dans le sens d'une utilisation du taux de changement de l'angle de relèvement pour réguler le comportement. L'utilisation de $\dot{\theta}$ est également approuvée par le fait que les angles de relèvement calculés sur la base des vitesses produites restent constant tout au long de l'essai et s'écartent des angles simulés (Figure 22).

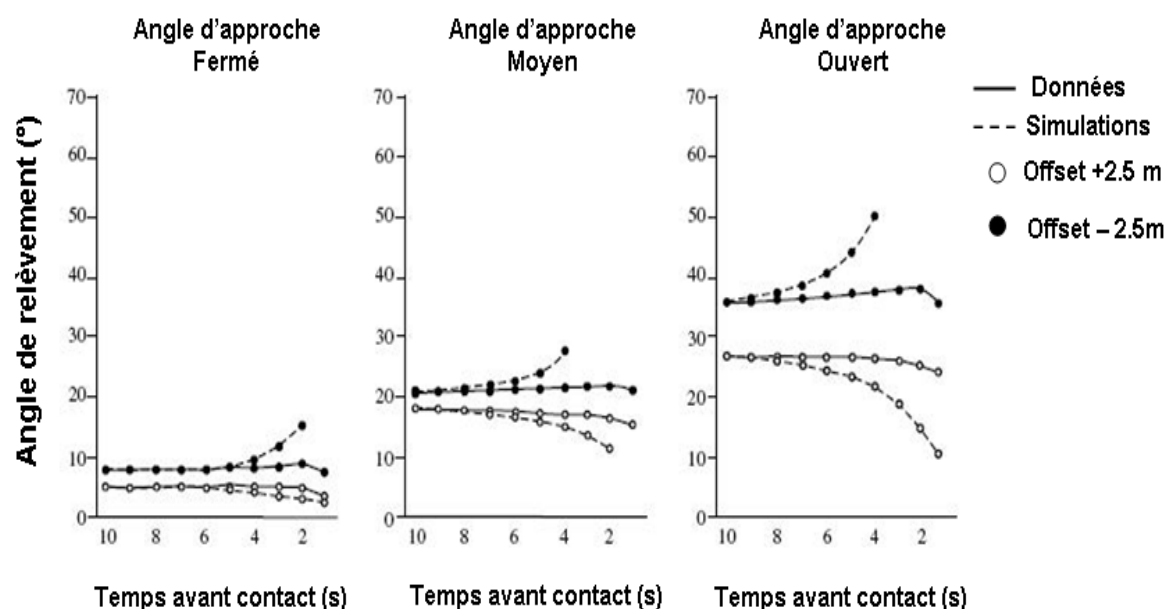


Figure 22 : Représentation, dans les différentes conditions d'angle d'approche et d'offsets (+2.5m et -2.5m), de l'angle de relèvement simulé (lignes en pointillés) dans le cas d'un maintien de la vitesse initiale et de l'angle de relèvement calculé sur la base des régulations motrices produites (lignes pleines). Les données s'écartent des simulations aussi bien dans le cas d'un offset positif (rond vides et blancs) que négatif (ronds pleins et noirs). De plus, les données s'écartent d'autant plus rapidement que l'angle d'approche est ouvert (de gauche à droite) (d'après Chardenon et al., 2005).

Les résultats obtenus par Chardenon et al. (2005) semblent démontrer que les régulations produites par les participants ont bien pour fonction d'annuler les changements d'angle de relèvement. Ces résultats confirment ceux obtenus auparavant avec un dispositif différent mais des manipulations expérimentales similaires (Lenoir et al., 1999a; Lenoir et al., 1999b; Lenoir et al., 2002) et permettent de montrer qu'indépendamment du système de locomotion utilisé, les agents utilisent la même loi de contrôle (CBA).

D'autres études (Chohan, Savelsbergh, van Kampen, Wind, & Verheul, 2006 ; Lenoir et al., 1999a) ont testé la capacité de cette loi de contrôle CBA à rendre compte cette fois-ci du comportement de régulation lorsque les contraintes environnementales sont manipulées pendant les essais. Dans certaines études la vitesse de déplacement de la balle était ainsi manipulée en cours d'essai induisant par la même une diminution ou une augmentation de l'angle de relèvement. Les résultats obtenus (Chardenon et al., Chohan, et al., 2006 ; Lenoir et al., 1999a) révèlent que les participants décélèrent ou accélèrent en fonction des changements angulaires induits par les changements de vitesses de la balle. Toutes ces études semblent montrer que la loi de contrôle CBA permet également de faire face à des changements de l'environnement pendant les essais. En ajustant avec la loi de contrôle CBA les régulations de vitesse produites dans les deux expériences, Chardenon et al. (2005) ont respectivement pu expliquer les comportements produits à hauteur de 63% et 70% de la variance totale.

Pris ensemble, les études présentées jusqu'à présent sur la loi de contrôle CBA (Chardenon et al., 2005 ; Chohan et al., 2006; Lenoir et al., 1999a; Lenoir et al., 1999b; Lenoir et al., 2002) ont permis de démontrer le caractère robuste de celle-ci. En effet, en dépit des manipulations du futur lieu d'arrivée de la balle, de l'angle d'approche ou encore de la vitesse de la balle au cours des essais, les agents sont en mesure de faire face à ces contraintes environnementales changeantes et de réussir les interceptions en utilisant une stratégie CBA.

3.3.3.2.4. Cas particulier des trajectoires courbées

Dans une étude réalisée par Bastin et al. (2006b), les auteurs ont également testé la robustesse de la loi de contrôle CBA en demandant cette fois-ci à des participants d'intercepter une balle dont la trajectoire pouvait être courbée. Les auteurs ont proposé trois lieux d'interception (i.e., offset positif, négatif ou nul). Pour chaque point d'interception, les

auteurs ont également proposé différentes trajectoires (Figure 23). Pour chaque futur lieu d'arrivée, la balle pouvait ainsi suivre une trajectoire rectiligne ou bien quatre trajectoires curvilignes distinctes (2 courbures négatives et 2 courbures positives, Figure 23).

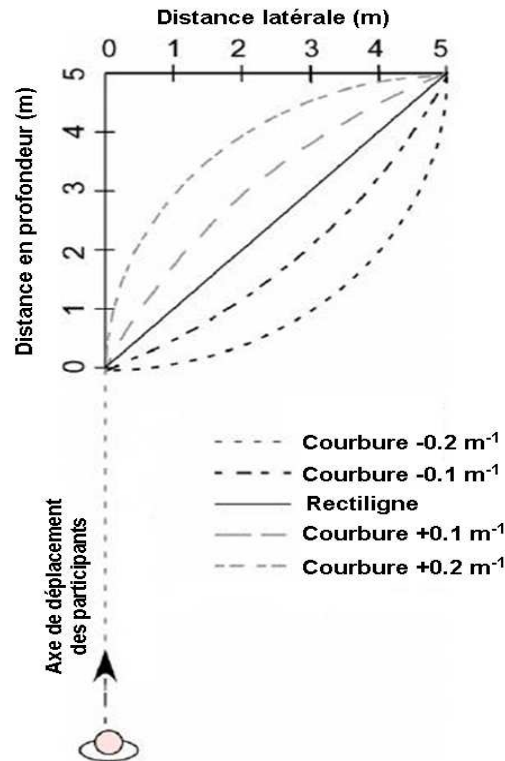


Figure 23 : Vue aérienne des cinq trajectoires de balles utilisées dans la condition d'offset nul. Pour un même point de départ et d'arrivée, les balles pouvaient suivre une trajectoire rectiligne (ligne pleine), deux trajectoires de courbure négative (concaves, représentées par les lignes en pointillés noirs), ou deux trajectoires de courbure positive (convexes, représentées par les lignes en pointillés gris) (d'après Bastin et al., 2006b).

Prenons l'exemple d'un offset nul pour lequel un maintien de la vitesse initiale garantit l'interception. L'intérêt de différentes courbures est que, si le participant maintient dans un premier temps sa vitesse initiale constante et qu'il utilise la loi de contrôle CBA pour réaliser la tâche, la courbure de la trajectoire entraîne des changements d'angle de relèvement qui devraient donner lieu à des régulations bien précises. Par exemple, dans le cas d'une trajectoire de courbure négative (Figure 23), si le participant maintient sa vitesse initiale constante, la courbure de la trajectoire entraîne une augmentation de l'angle de relèvement tout au long de l'essai. Cette augmentation est d'autant plus importante que la courbure est marquée. S'ils mettent en œuvre la loi de contrôle CBA, les participants doivent donc décélérer dans un premier temps (puisque $\dot{\theta} > 0$), ce qui aura pour conséquence une diminution de l'angle de relèvement (i.e., $\dot{\theta} < 0$) dans la deuxième partie de la courbure. Les

participants doivent alors accélérer en conséquence. La trajectoire positive (i.e., convexe) entraîne des changements angulaires opposés à ceux décrits pour la trajectoire négative et devraient donner lieu à des régulations opposées (i.e., une accélération suivie d'une décélération).

Les résultats obtenus par Bastin et al. (2006b) sont conformes à ces prédictions. Dans la condition d'offset nul, les participants produisent des profils de vitesse différents pour chaque modalité de courbure (Figure 24A). Ainsi, alors qu'aucune régulation n'était nécessaire pour réussir la tâche, la production de profils de vitesse opposés selon les courbures de trajectoire est conforme aux prédictions faites sur la base de du principe de contrôle CBA. De plus, la comparaison entre l'évolution des angles de relèvement simulés (courbes en pointillés de la Figure 24B) et ceux calculés sur la base des régulations motrices produites (courbes avec symboles de la Figure 24B), montre clairement un décalage entre les courbes qui s'accroît au cours de l'essai. Ces résultats confirment la volonté des participants d'annuler, ou tout du moins de réduire les changements de l'angle de relèvement induits par les courbures.

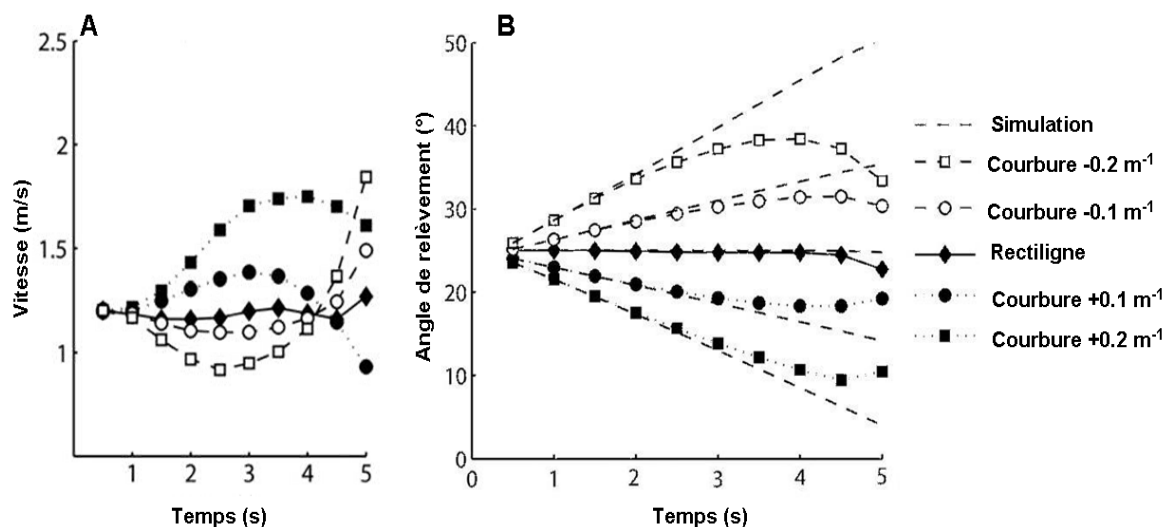


Figure 24 : (A) Evolution au cours du temps des vitesses produites par les participants dans les différentes conditions de trajectoire dans la condition d'offset 0 m. (B) Evolution au cours du temps de l'angle de relèvement simulé ainsi que l'évolution de l'angle de relèvement calculé sur la base des régulations produites par les participants dans les différentes trajectoires (d'après Bastin et al., 2006b).

En ajustant les comportements produits par les participants avec la loi de contrôle CBA (Equation 12), les auteurs sont à même d'expliquer 75% des régulations comportementales produites. Cette étude démontre une nouvelle fois le caractère robuste de la loi de contrôle CBA. Elle montre également que le principe de contrôle basé sur le taux de changement de l'angle de relèvement permet d'expliquer qualitativement et quantitativement les

comportements de régulations produits par les participants face à des trajectoires rectilignes et curvilignes.

3.3.3.2.5. *Différentes possibilités d'accéder à l'information*

Pour mettre en œuvre la loi de contrôle CBA, l'agent dispose de différents modes d'accès au taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$). Il peut ainsi accéder à $\dot{\theta}$ par le flux optique en référant la balle au focus d'expansion optique (mode d'accès optique, Figure 25A) ou alors en procédant à un codage égocentrique (i.e., Direction Egocentrique) de la position de la balle à partir de repère visuel (mode d'accès visuel, Figure 25B). Dans l'environnement utilisé par Chardenon et al. (2004), ce codage égocentrique de la direction est rendu possible par la ligne médiane qui matérialise le prolongement de l'axe corporel médian (Figure 25C). Chardenon et al. (2004) ont donc voulu savoir lequel de ces deux modes d'accès était utilisé par les agents pour prélever et utiliser le taux de changement de l'angle de relèvement. Ils ont donc différencié les régulations produites à partir du mode d'accès optique à $\dot{\theta}$ (i.e., le FEO, cf., Equation 13), des régulations produites à partir du mode d'accès visuel à $\dot{\theta}$ (i.e., la Direction Egocentrique, cf., Equation 14) :

$$\ddot{Y} = -k \left[\arctan \left((X_{balle} - FEO) / (Y_{balle} - Y_{agent}) \right) \right] \quad (\text{Equation 13})$$

et

$$\ddot{Y} = -k \left[\arctan \left((X_{balle} - DE) / (Y_{balle} - Y_{agent}) \right) \right] \quad (\text{Equation 14})$$

avec X_{balle} correspondant à la position latérale de la balle, Y_{balle} et Y_{agent} correspondant respectivement à la position dans la profondeur de la balle et de l'agent, FEO correspond à la position du focus d'expansion optique et DE correspond au codage égocentrique visuel de la balle (i.e., par rapport à l'axe corporel médian).

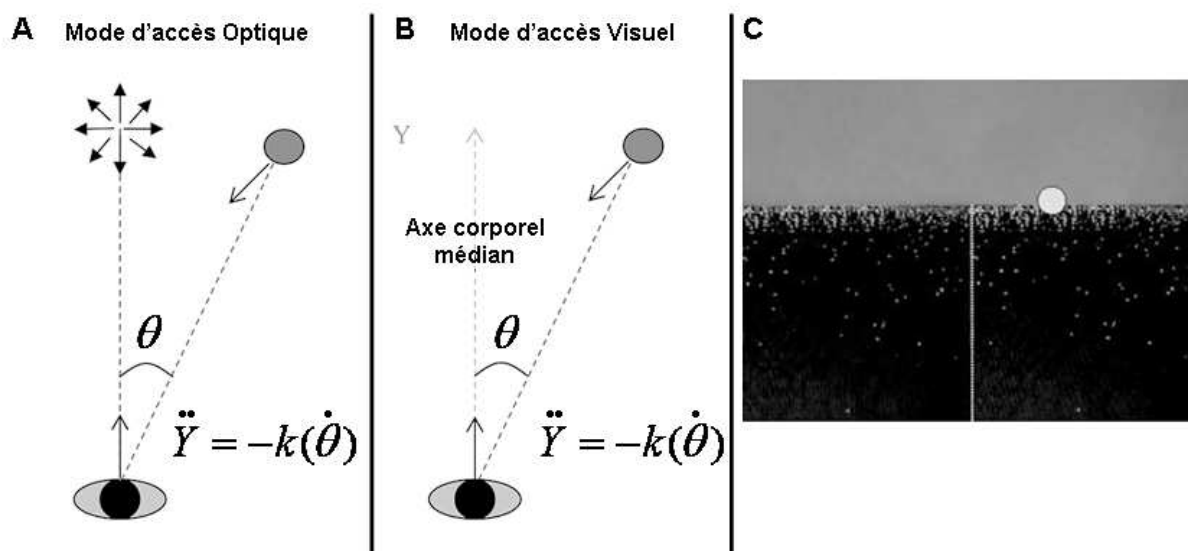


Figure 25 : Représentation schématique des deux modes d'accès au taux de changement de l'angle de relèvement testés par Chardenon et al. (2004) dans un environnement virtuel (C). (A) le mode d'accès optique consiste pour un agent à référer la position de la balle au FEO (θ). (B) le mode d'accès visuel consiste à référer la position de la balle à l'axe corporel médian (θ) (modifié d'après Chardenon et al., 2004).

Dans la majorité des situations quotidiennes, les deux modes d'accès illustrés sur la figure ci-dessus sont confondus, si bien qu'il est très difficile de savoir s'ils sont utilisés séparément ou conjointement. Pour contourner ce problème, Chardenon et al. (2004) ont utilisé le paradigme de dé-corrélation afin de pouvoir différencier les deux modes d'accès l'un de l'autre. Pour ce faire, ils ont induit des mouvements d'aller-retour du plan porteur vers la droite ou vers la gauche donnant lieu à des prédictions comportementales inverses selon le mode d'accès utilisé (Equation 13 et 14). Lorsque le plan porteur bouge vers la droite (image du milieu de la Figure 26A), cela crée un décalage du FEO dans la direction opposée qui se traduit par une augmentation de l'angle de relèvement selon le mode d'accès optique (illustré en orange sur la Figure 26A). Si ce mode d'accès est utilisé, alors une décélération est attendue dans la première partie de l'essai. Lorsque le plan porteur revient vers la gauche (image du bas de la Figure 26A), cela crée un décalage du FEO vers la droite qui traduit une diminution de θ selon le mode d'accès optique (illustré en orange sur l'image du bas de la Figure 26A). Une accélération est alors attendue dans la deuxième partie de l'essai si c'est ce mode d'accès qui est privilégié. Les mêmes illustrations de la Figure 26A indiquent que dans les mêmes conditions de mouvement du plan porteur, les effets inverses sont attendus selon le mode d'accès visuel (illustré en blanc). Ainsi, si les participants utilisent le mode d'accès visuel, ils devraient produire une accélération (suite à une diminution de θ , image du milieu

de la Figure 26A) dans la première partie de l'essai, suivie d'une décélération dans la deuxième partie de l'essai (suite à une augmentation de θ , image du bas de la Figure 26A).

Les résultats obtenus correspondent exactement aux prédictions faites dans le cas de l'utilisation du mode d'accès visuel (i.e., mouvement Droite-Gauche, Figure 26B). Ces résultats démontrent que les participants produisent des régulations en utilisant le mode d'accès visuel (i.e., la DE) au taux de changement de l'angle de relèvement pour mettre en œuvre la loi de contrôle CBA. De plus, dans les conditions opposées de mouvement du plan porteur (i.e., mouvement Gauche-Droite, Figure 26B), les participants produisent des profils de vitesse parfaitement opposés. Un ajustement des profils de vitesse avec le modèle liant l'accélération et le taux de changement de l'angle de relèvement accessible à partir du codage égocentrique visuel (Equation 14), rend compte de 67% de la variance totale du comportement produit. Cependant, en proposant un modèle prenant en compte les deux modes d'accès (i.e., flux optique et égocentrique), les auteurs arrivent à rendre compte des régulations de vitesse produites jusqu'à 91% de la variance totale.

Les résultats de Chardenon et al. (2004) démontrent que les participants utilisent les deux modes d'accès testés pour prélever le taux de changement de l'angle de relèvement. Cependant, comme cela a été également mis en évidence dans une tâche de conduite automobile (Wilkie & Wann, 2002), les auteurs mettent en évidence une dominance du codage égocentrique visuel dans le contrôle de l'action.

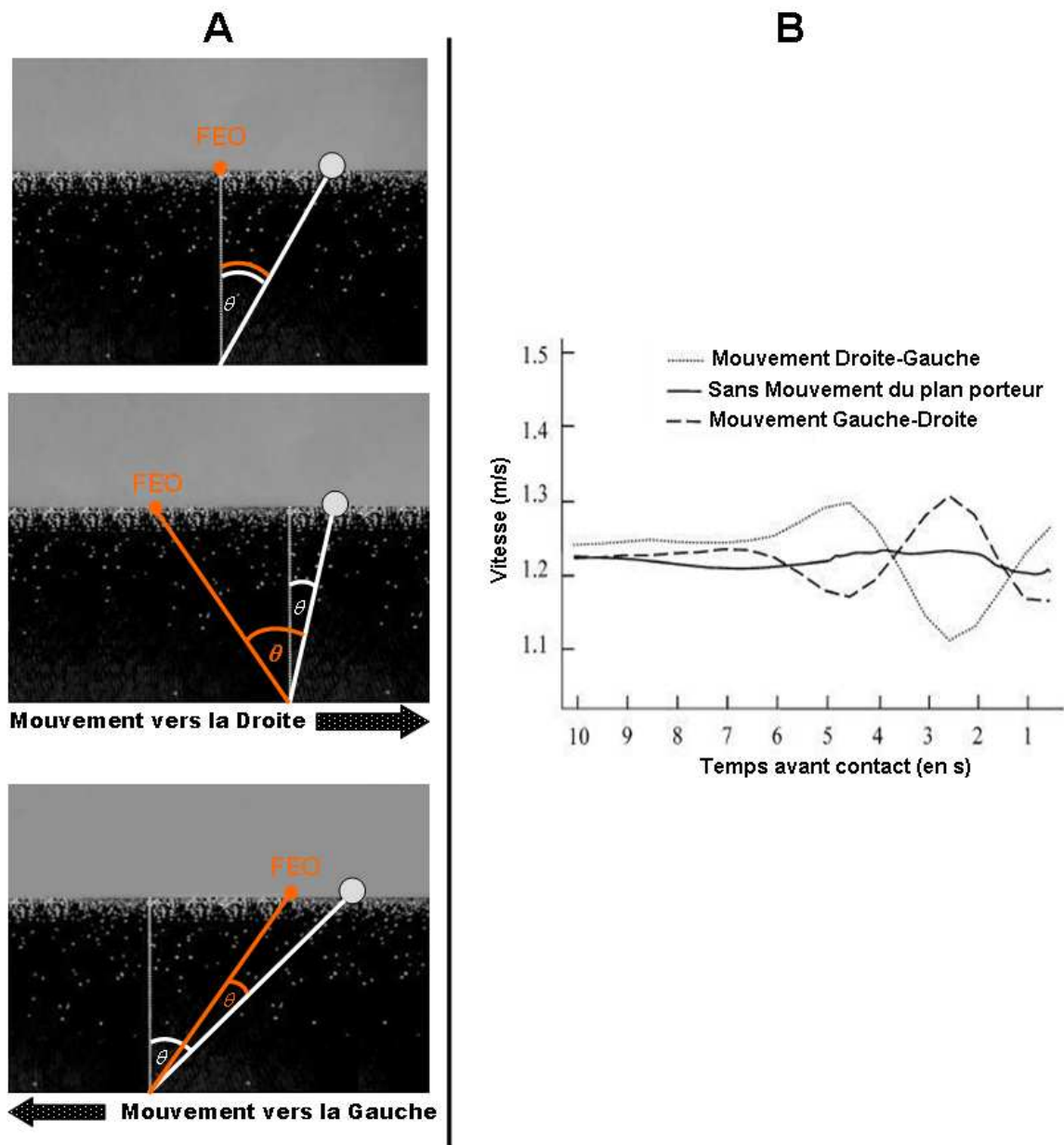


Figure 26 : (A) Illustration des effets des déplacements du plan porteur vers la droite puis vers la gauche. En position initiale (image du haut), le FEO (en orange) et la DE (en blanc) sont superposés et donnent accès au même angle de relèvement. Lorsque le plan porteur bouge vers la droite (image du milieu), l'axe corporel médian se rapproche de la balle tandis que le FEO se décale dans la direction opposée. Si le participant accède à l'angle de relèvement sur la base de la DE alors le taux de changement de l'angle de relèvement diminue (i.e., l'angle en blanc) et le participant doit accélérer en conséquence. En revanche, si le participant se base sur le FEO, θ augmente (angle orange) et il doit donc décélérer. Lorsque le plan porteur bouge vers la gauche (image du bas), l'axe corporel médian s'éloigne de la balle. Ainsi, si le participant se base sur la DE pour prélever l'angle de relèvement, alors il doit décélérer car l'angle de relèvement augmente (angle blanc). A l'inverse, le FEO est décalé vers la droite et se rapproche de la balle induisant une diminution de l'angle de relèvement (angle orange). Si le participant utilise ce mode d'accès pour prélever l'angle de relèvement, alors il doit accélérer. (B) Représentation des vitesses produites par les participants dans les différentes conditions de mouvement du plan porteur. Lorsque le plan porteur bouge vers la droite puis revient vers la gauche, les participants produisent une accélération suivie d'une décélération. Dans la condition de mouvement opposée, les participants produisent un profil de vitesse inverse. Lorsque le plan ne bouge pas, les participants maintiennent leur vitesse initiale (d'après Chardenon et al., 2004).

Ces études amènent cependant certaines remarques. La première est liée à la dominance d'un mode d'accès sur l'autre. En effet, il a été montré dans les tâches de marche vers une cible stationnaire, qu'à mesure que la richesse du flux optique était améliorée, les participants délaissaient la Direction Egocentrique pour utiliser le flux optique (Warren et al., 2001). Il est alors possible que l'environnement choisi par les auteurs détermine en grande partie la dominance d'un mode d'accès sur l'autre. La deuxième remarque concerne la distinction des différents modes d'accès à l'information. En effet, Chardenon et al. (2004) distinguent uniquement deux modes d'accès reposant sur le FEO ou la Direction Egocentrique. Cependant, cette Direction Egocentrique peut être accessible par différents corrélats sensoriels puisqu'un agent peut y accéder par la vision sur la base d'un repère visuel (e.g., l'emblème Mercedes sur le capot d'une voiture, Wilkie & Wann, 2002), mais également par la proprioception sur la base de tensions musculaires (Roll et al., 1991).

Bastin et Montagne (2005) ont suivi cette piste de réflexion en distinguant trois modes d'accès différents au taux de changement de l'angle de relèvement: (i) le mode d'accès optique (Figure 27A), (ii) le mode d'accès visuel (Figure 27B), et (iii) le mode d'accès proprioceptif (Figure 27C). Les auteurs ont repris le protocole des mouvements du plan porteur décrit précédemment. Il est important de noter que ces mouvements du plan porteur n'affectaient jamais le mode d'accès proprioceptif. Pour savoir si ces trois modes d'accès pouvaient être utilisés conjointement ou séparément, Bastin & Montagne (2005) ont également proposé différents environnements plus ou moins structurés permettant l'utilisation conjointe ou séparée des différents modes d'accès à l'information. Bastin et Montagne (2005) ont ensuite tenté de rendre compte, avec la loi de contrôle CBA, des régulations produites dans les différents environnements selon les mouvements du plan porteur.

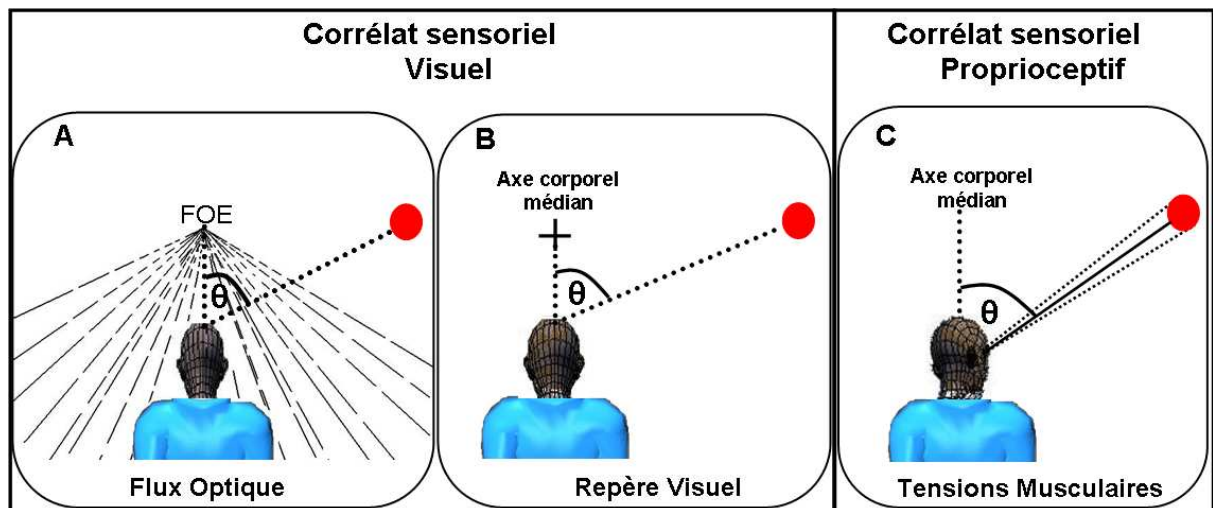


Figure 27 : Illustration des différents modes d'accès à l'angle de relèvement (θ) au travers de deux corrélats sensoriels distincts (la vision et la proprioception). Pour accéder à l'angle de relèvement, l'agent peut utiliser le mode d'accès proprioceptif (C) et/ou visuel (B) pour référer la position de la balle par rapport à son axe corporel médian défini respectivement par des tensions musculaires ou un repère visuel. L'agent peut également prélever l'angle de relèvement en utilisant le flux optique comme mode d'accès (A), en référant dans ce cas la position de la balle par rapport au Focus d'Expansion Optique (FEO) (modifié d'après Bastin & Montagne, 2005).

Leurs résultats montrent que la loi de contrôle CBA permet d'expliquer presque 58% des régulations comportementales produites par les participants en réponse aux mouvements du plan porteur. En intégrant les trois modes d'accès au taux de changement de l'angle de relèvement dans la loi de contrôle CBA, les auteurs mettent en évidence la dominance du mode d'accès proprioceptif sur les deux autres modes d'accès (optique et repère visuel). En effet, quel que soit l'environnement utilisé (Figure 27B et 27A, respectivement), les régulations comportementales produites reposent majoritairement sur le mode d'accès proprioceptif (72% et 54%, respectivement).

Cette étude révèle également que lorsqu'ils sont disponibles, les trois modes d'accès à l'information sont utilisés conjointement (cf., également Chardenon et al., 2004). Contrairement aux autres études décrites précédemment, cette étude de Bastin et al. (2005) démontre le rôle central joué par le corrélat sensoriel proprioceptif dans le processus de contrôle d'une action d'interception et plus particulièrement dans l'accès au taux de changement de l'angle de relèvement. Cette dominance du mode d'accès proprioceptif dans le contrôle d'une action locomotrice a été démontrée de manière plus directe par Bastin, Calvin et Montagne (2006a) en utilisant un dispositif de vibration myotendineuse des muscles du cou. Les auteurs ont ainsi pu dé-corréler de manière spécifique ce mode d'accès proprioceptif. Les régulations comportementales observées ont permis aux auteurs de mettre en évidence

que quelle que soit la richesse de l'environnement (i.e., la possibilité d'accéder à l'angle de relèvement par plusieurs modes d'accès), une vibration des muscles du cou entraînent des régulations de la vitesse de déplacement des participants, en accord avec les changements de l'angle de relèvement si le mode d'accès est proprioceptif.

En conclusion de cette partie, toutes les études qui se sont intéressées au contrôle des actions d'interception à partir du taux de changement de l'angle de relèvement (Bastin & Montagne, 2005 ; Bastin et al., 2006a ; Bastin et al., 2006b; Chardenon et al., 2002; Chardenon et al., 2004, 2005; Chohan et al., 2006; Lenoir et al., 1999a; Lenoir et al., 2002) démontrent que la loi de contrôle CBA permet à un agent de faire face à des contraintes environnementales changeantes aussi bien pendant un essai que d'un essai à l'autre. Cette loi de contrôle CBA représente donc pour les participants une solution très robuste afin de contrôler leur action d'interception avec déplacement puisqu'elle permet à l'agent de contrôler et réussir son action en dépit des conditions variables de la tâche (vitesse, angle d'approche, courbure). De plus, pour accéder à une même information (le taux de changement de l'angle de relèvement), l'agent dispose de plusieurs modes d'accès qui lui permettent de réaliser la tâche de manière efficace quel que soit l'environnement.

4. *Problématique de la thèse*

La partie précédente révèle la robustesse d'un principe de contrôle consistant à moduler son accélération de façon à annuler le taux de changement de l'angle de relèvement. Cependant, cette revue de littérature révèle également certaines limites de cette loi de contrôle CBA. En effet, ces études ont toutes utilisé un environnement constitué uniquement d'un plan porteur texturé fournissant peu d'alternatives à l'utilisation de la loi de contrôle CBA. D'autre part, ces études ne s'adressaient qu'à une seule et même catégorie d'agents. Cette thèse a donc pour objectif d'éprouver la robustesse de la loi de contrôle CBA selon deux angles distincts : les caractéristiques des environnements dans lesquels cette loi de contrôle a été testée et les populations étudiées.

Dans le premier chapitre expérimental, nous avons souhaité tester la robustesse de la loi de contrôle CBA lorsque les interceptions sont réalisées dans un environnement enrichi. L'ajout d'informations pourrait amener les agents à mettre en œuvre différents principes de

contrôle reposant sur des informations différentes. Etant donné qu'il a été montré dans d'autres études que la richesse de l'environnement joue un rôle sur l'information utilisée (DE ou FEO), les environnements appauvris utilisés dans les études précédentes pourraient avoir facilité la mise en œuvre de la loi de contrôle CBA. Ce chapitre expérimental se scinde en deux parties. Dans un premier temps nous allons proposer un environnement offrant des informations supplémentaires autorisant la mise en œuvre d'autres principes de contrôle que le CBA. Nous allons ainsi pouvoir examiner la façon avec laquelle un agent contrôle son action d'interception lorsque l'environnement offre la possibilité d'utiliser d'autres informations que le taux de changement de l'angle de relèvement. Plus particulièrement, nous allons structurer l'environnement de telle sorte qu'il sera possible pour l'agent d'accéder au futur lieu d'interception. Ainsi, les participants pourront mettre en œuvre à la fois la loi de contrôle CBA et une loi de contrôle reposant sur la prise en compte du futur lieu d'arrivée de la balle (la loi de contrôle Vitesse Requise). Cet enrichissement du support informationnel nous permettra de savoir si la loi de contrôle CBA peut résister à la présence d'indices prédictifs prégnants. Dans la deuxième partie de ce chapitre expérimental nous essaierons d'identifier précisément le support informationnel utilisé pour mettre en œuvre la loi de contrôle RV reposant à la fois sur la prise en compte du point d'interception et sur la vitesse de déplacement de l'agent. En effet, si l'information prise en compte dans la loi de contrôle CBA est bien connue, à ce jour peu d'études se sont intéressées aux invariants pris en compte pour mettre en œuvre la loi de contrôle RV dans des tâches d'interception avec déplacement. La vitesse requise et la vitesse courante de déplacement sont les deux composantes de la loi de contrôle RV. Comme cela a été fait pour la loi de contrôle CBA, nous avons décidé de décorrélérer l'information de cette loi de contrôle RV en manipulant le flux optique et par conséquent la vitesse courante de déplacement. Notre but était donc dans un premier temps d'identifier les invariants optiques utilisés par les agents afin de contrôler leur vitesse de marche. Nous avons donc choisi, dans une tâche de locomotion, d'utiliser le paradigme de décorrélation afin de tester spécifiquement deux invariants spécifiant la vitesse de déplacement. Ensuite, nous avons repris le paradigme de décorrélation de la vitesse courante de déplacement afin d'induire, dans une tâche d'interception, des régulations motrices spécifiques. Afin de s'assurer également de l'utilisation ou non du CBA nous avons proposé différentes courbures de trajectoire. Ainsi, cette expérience a pour but de montrer comment un agent contrôle l'action lorsque deux lois de contrôle induisent des régulations distinctes.

Dans le deuxième chapitre expérimental, nous avons voulu tester la robustesse de la loi de contrôle CBA en nous intéressant à la deuxième limite de cette loi de contrôle liée à la population d'agent utilisée dans les études décrites. En effet, tous les travaux réalisés sur la loi de contrôle CBA ont permis de révéler le caractère robuste de celle-ci en utilisant un seul type de population d'agent : majoritairement des jeunes hommes sains ayant une moyenne d'âge comprise entre 20 et 30 ans selon les études. Le vieillissement s'accompagne d'une diminution lente et progressive des capacités de notre système moteur, de notre système nerveux et de tous nos systèmes perceptifs. Il a ainsi été montré que les seniors possèdent, d'un point de vue général, une perception visuelle et proprioceptive moindre que celle des jeunes. Or certaines expériences ont permis de mettre en évidence l'utilisation simultanée de plusieurs modes d'accès perceptifs pour accéder au taux de changement de l'angle de relèvement, avec une dominance de mode d'accès proprioceptif. Il est alors tout à fait légitime de se demander si cette loi de contrôle CBA s'applique toujours pour des populations présentant une dégradation des capacités de leurs systèmes perceptifs. Théoriquement un principe de contrôle perceptivo-moteur est suffisamment robuste pour expliquer le comportement de régulation produit par différents agents engagés dans la même tâche. La robustesse du CBA ayant été mise en évidence dans de nombreuses études, nous avons donc voulu la tester en examinant le comportement de régulation produit par une population vieillissante, dans une tâche d'interception. Dans la même logique, nous avons voulu savoir si cette même loi de contrôle explique le comportement d'interception d'un agent présentant une absence quasi-totale de proprioception. Pour tester cela nous avons demandé à une patiente dé-afférentée et des populations d'agents jeunes et seniors de réaliser des interceptions dans des environnements virtuels de différentes richesses.

CHAPITRE 2

L'interception et ses différentes lois de contrôle

1. Interception d'un mobile dans un environnement riche

Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled²

ABSTRACT

This study concerns the process by which agents select control laws. Participants adjusted their walking speed in a virtual environment in order to intercept approaching targets. Successful interception can be achieved with a constant bearing angle (CBA) strategy that relies on prospective information, or with a modified required velocity (MRV) strategy, which also includes predictive information. We manipulated the curvature of the target paths and the display condition of these paths. The curvature manipulation had large effects on the walking kinematics when the target paths were not displayed (informationally poor display). In contrast, the walking kinematics were less affected by the curvature manipulation when the target paths were displayed (informationally rich display). This indicates that participants used an MRV strategy in the informationally rich display and a CBA strategy in the informationally poor display. Quantitative fits of the respective models confirm this information-driven switch between the use of a strategy that relies on prospective information and a strategy that includes predictive information. We conclude that agents are able of taking advantage of available information by selecting a suitable control law.

² Morice, A. H., Francois, M., Jacobs, D. M., & Montagne, G. Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Exp Brain Res*, 202(2), 397-411.

INTRODUCTION

During the last few decades, a number of laws of control have been proposed to account for the perceptual control of goal-directed displacements (e.g., Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2004; Peper, Bootsma, Mestre, & Bakker, 1994; Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001; Wilkie & Wann, 2002, see also Fajen, 2005a, for a critical review). These laws of control have been shown to account for the behavior of different kinds of agents, including humans, insects, and robots (Duchon & Warren, 2002), and also for the regulation of behavior under a wide variety of experimental conditions (Chardenon et al., 2005). Even so, it is probable that agents are able to select different control laws in different situations (e.g., use different control strategies depending on environmental constraints). To give an example, a particular agent might use a different control law for the interception of a fully predictable target movement than for an unpredictable target. We believe that the selection of control laws raises questions that are worthy of being addressed (cf., Lenoir, Vansteenkiste, Vermeulen, & de Clercq, 2005; Schöner & Dose, 1992; Warren, 1988; Warren & Kay, 1997). One might ask, for instance, how widely a particular control law is applied or if and how task constraints affect which control law has been selected. Such questions arise in everyday situations. Consider a car driver that has to adjust his or her forward motion with respect to approaching vehicles. This might occur when the driver arrives at a roundabout or at an intersection with a bicycle path or an intersection with tramlines. Depending on weather conditions or the height of roadside vegetation, the path of the approaching vehicle might or might not be visible. An intersection that is clearly visible under normal weather conditions, for instance, might not be so with snowfall. To what extent does the visibility of the path of the approaching vehicle affect the driver's control of forward motion? Or, more generally, to what extent does the visibility of the path of motion of moving objects affect the control of agents that interact with the objects? To address this type of questions we chose to use the following experimental paradigm.

Participants in our experiment walked on a straight path through a virtual environment and adjusted their walking speed in order to intercept approaching targets. This paradigm is well suited to our purpose because the visibility of the target paths can easily be manipulated and because different perceptual-motor strategies can be used to perform the task. A first candidate control law is the constant bearing angle (CBA) strategy. The bearing angle is the angle subtended by the current position of the target and the direction of displacement of the observer (Figure 28A). Using a CBA strategy means walking so as to maintain the bearing

angle constant, which leads one to intercept the target.³ The CBA strategy is prospective in the sense that the absence of change in the bearing angle informs participants about the sufficiency of their current regulation. The strategy gives rise to an on-line control of the action independently of the place and time of arrival of the ball (cf., Beek, Dessing, Peper, & Bullock, 2003; Michaels & Oudejans, 1992; Montagne, 2005).

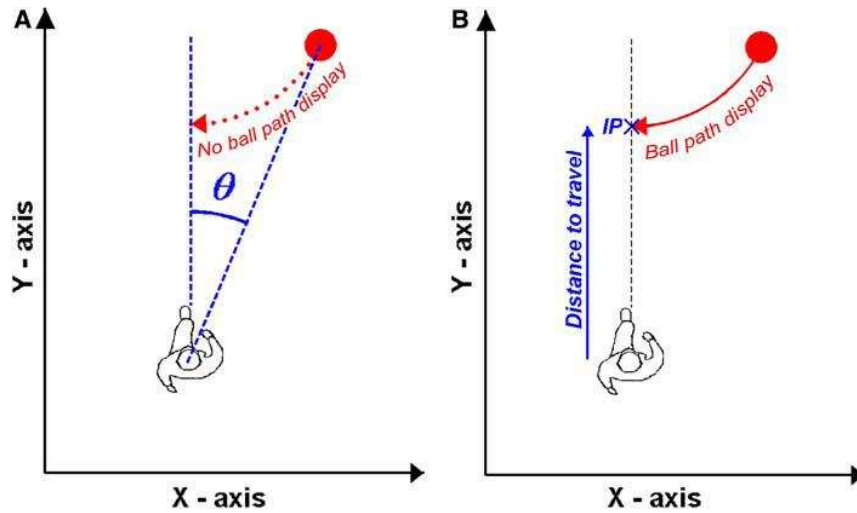


Figure 28 : Schematic sketches of the experimental layout. Participants walked on a rectilinear path and aimed to intercept balls that traveled toward their displacement axis. A: The natural informational content of the agent-ball environment includes the bearing angle (θ), which forms the informational support of the CBA strategy. The CBA strategy holds that the agent's velocity is regulated so as to cancel change in θ . B: When the ball track is displayed on screen, the informational content of the visual scene is enriched relative to natural conditions. The distance to the interception point (IP) is part of the informational support of the MRV strategy.

Following Warren et al. (2001) and Wilkie et Wann (2002), the CBA strategy can be modeled with a point-attractor system architecture:

$$\ddot{Y}(t) = \frac{1}{1 + 200 \times e^{-10 \times t}} \times k_1 \times \dot{\theta}(t - vmd) + k_2 \times \dot{Y}(t) \quad . \quad (\text{Equation 1})$$

In this equation, $\dot{Y}$ is the walking speed (in m/s), $\ddot{Y}$ is the acceleration (in m/s²), $\dot{\theta}$ is the rate of change of the bearing angle (in deg/s, with $\dot{\theta} > 0$ indicating an increase in θ), k_1 is

³ Other prospective strategies are possible if the visual environment contains a structured background. For instance, moving so as to keep the same distant object occluded by the target would also lead to the interception of the target.

a parameter that modulates the strength of the coupling between $\ddot{Y}$ and $\dot{\theta}$, and k_2 is a parameter that modulates the strength of the damping term. The parameter vmd is a visuo-motor delay that is estimated to be 100 ms (cf., Zago, McIntyre, Senot, & Lacquaniti, 2009).⁴

The function $\frac{1}{1 + 200 \times e^{-10 \times t}}$ is an S-shaped or sigmoid activation function of time t that increases from close to 0 at $t=0$ to close to 1 at $t=1$. This function accounts for the time needed by agents to detect the bearing angle and modify their velocity accordingly at the beginning of the trial.

We have previously shown that this apparently simple control strategy accounts for the regulation of participants' walking speed when task constraints are varied within trials (Chardenon et al., 2005) and between trials (Bastin et al., 2006b), and also when the informational content of the visual scene is impoverished (Bastin & Montagne, 2005) or biased (Bastin, Jacobs, Morice, Craig, & Montagne, 2008). The visual environments (non-stereo images) that were used in these previous studies consisted of a textured ground plane and the ball to be intercepted and, as such, provided few alternatives to the use of the CBA strategy. In the current experiment, we present additional information, which allows participants to use other control strategies, and hence allows us to study if and how individuals select among the different candidate strategies.

In the framework of predictive strategies, both place and time of arrival of the ball act as input variables. As an example, pre-programmed interceptive movements might be triggered when predictive information reaches a threshold value (Tresilian, 2005; Tydesley & Whiting, 1975). Such strategies are likely to be used only in a limited range of interceptive tasks, for instance when the movement time is very short and/or when a moving target is intercepted indirectly (e.g., Benguigui, Ripoll, & Broderick, 2003; Smith, Flach, Dittman, & Stanard, 2001). Given that the effectiveness of predictive strategies depends on the accuracy of the initial predictions, any information that would allow observers to better discriminate the time and place of arrival of the ball should be expected to facilitate the operation of this type of strategies. To our knowledge, however, no purely predictive strategies have been proposed for the interception of moving targets on foot, which should not lead one to discard the possibility

⁴ Additional simulations were performed that used delays of up to 0.2 s. These simulations led to reasonably similar predictions. The same was true for the model described in Equations 2 and 3. We speculate that the precise value of the delay is not crucial in this task because the implied variables change fairly slowly as compared to in faster interception tasks such as catching.

that predictive information is used as part of an on-line regulation process (cf., Desmurget & Grafton, 2000; Starks, Helsen, & Elliott, 2002).

As an alternative to purely prospective and purely predictive control strategies, hybrid strategies might involve information-based control architectures that resemble prospective ones but that include predictive information. An example of a hybrid strategy is the required velocity model considered in this study (Figure 28B; cf., Bastin et al., 2008). This model is related to the required velocity model for hand movements (Peper et al., 1994; cf., Bootsma, Fayt, Zaal, & Laurent, 1997; Jacobs & Michaels, 2006) The model holds that

$$\ddot{Y}(t) = k_1 \times (k_2 \times \dot{Y}_{req}(t - vmd) - \dot{Y}(t - vmd)) \quad (\text{Equation 2})$$

and that

$$\dot{Y}_{req}(t) = (Y_{IP} - Y(t))/TTC(t) , \quad (\text{Equation 3})$$

in which Y , $\dot{Y}$, and $\ddot{Y}$ are the participant's position, speed, and acceleration. The parameter vmd is the visuo-motor delay (100 ms), $\dot{Y}_{req}$ is the required walking speed, Y_{IP} is the future interception position, and TTC is the time remaining before the ball reaches Y_{IP} . Finally, k_1 and k_2 are constants.

Equation 2 holds that participants accelerate according to a difference between the actual and required velocities; at this level the strategy is prospective in the sense that participants are informed about the sufficiency of the current regulations. Predictive information is embedded in Equation 3 in the form of time-to-contact information and information concerning the future interception point. With the inclusion of predictive information the model differs from other required velocity models. In fact, required velocity models were introduced to provide an alternative to the use of predictive information (Peper et al., 1994). To acknowledge this difference, we refer to Equations 2 and 3 as a *modified* required velocity (MRV) model.⁵

To summarize, the control laws considered in this study are a strategy that relies on prospective information (the CBA strategy) and a strategy that also includes predictive

⁵ We tested several versions of the MRV model. However, the additional simulations did not lead to better overall fits than Equations 2 and 3. The results of the additional simulations are therefore not reported.

information (the MRV strategy). The CBA strategy can be classified as a prospective control law and the MRV strategy as a hybrid (prospective-predictive) control law. The issue addressed in the study concerns the possible influence of environmental constraints on the type of strategy used to intercept moving targets on foot. As described below, the environmental constraints that we manipulate concern the informational content of the visual scene.

The selection of different laws of control according to the visual content of a scene has previously been addressed by Lenoir et al. (2005), who asked volleyball players to intercept volleyballs that approached them on straight or curved trajectories. The curved trajectories were accompanied by spin of the balls, which was more visible for colored balls than for white balls. The players exhibited displacement reversals for curved trajectories, despite the fact that the initial position of the players coincided with the place of arrival of the ball (see Montagne, Laurent, Durey, & Bootsma, 1999, for a similar effect in one-handed catching). These reversals indicate the operation of a prospective type of control in which players maintain a lateral alignment with the ball. Interestingly, the reversals were less pronounced when colored balls were used, which is to say, when local predictive information related to spin was available. These results provide a first indication that environmental constraints (in this case local information available on the ball itself) can affect the type of control law that is selected to perform interceptive actions.

The present study further investigates and extends such findings using a task that requires whole-body displacements. More precisely, we test the robustness of the CBA strategy in the presence of strong spatial information. Participants walked along a straight trajectory through a virtual environment and they were asked to adjust their walking speed in order to intercept moving targets. In previous experiments, the curvature of the ball path has been shown to influence the participants' displacements as predicted by the CBA strategy (Bastin et al., 2006b). In the present experiment, we manipulated both the curvature of the ball path and the display condition of the ball path (look ahead to Figure 30B). Displaying the ball path consisted of presenting the track followed by the ball, from the starting position of the ball to the place of contact, as a white stripe through the virtual environment. In the condition in which the ball path was displayed, predictive information about the ball path curvature and the place of arrival of the ball was made explicit. This additional information allows participants to use several control laws, and hence allows us to study if and how, depending on the informational content of the environment, participants select among the different candidate control laws.

METHOD

Participants

Eleven male and two female students (mean age 25 ± 2 years) gave their informed consent before participating in the experiment. They all had normal or corrected-to-normal vision, and their experience with ball games varied. A local ethics committee approved the experimental protocol.

Apparatus

A general overview of the experimental set-up is presented in Figure 29. The set-up comprised a treadmill (Gymrol, BRL 1800), a large projection screen (2.3-m height $\times$ 3.0-m wide), a video projector (BARCO IQ 500), and two computers (cf., Bastin et al., 2006b; de Ruy, Montagne, Buekers, & Laurent, 2000). Participants walked on the treadmill, equipped with a 0.6-m wide $\times$ 1.80-m long moving belt that glided over a flat and rigid surface. Participants were attached to the back of the treadmill by means of a weight-lifting belt and a rigid rod, which allowed small vertical and sideward movements while participants walked on the treadmill. The projection screen was positioned in front of participants, at a distance of 0.70 m, providing a $118^\circ \times 130^\circ$ field of view. The velocity of the treadmill was sampled via an optical encoder and sent by a RS-232 serial communication to a PC workstation that used this velocity to generate the movement of the visual scene. The visual scene was projected onto the screen by a video-projector at an update rate of 60 frames/s. The visual scene consisted of a textured ground plane (bricks), a 0.1-m wide brown displacement axis, and a spherical, moving, red target with a physical diameter of 0.22 m and an optical size that naturally expanded during the approaches. The spatiotemporal performance of the virtual environment is estimated to allow the visual consequences of a change in walking speed to be displayed within a maximum delay of 30 ms.

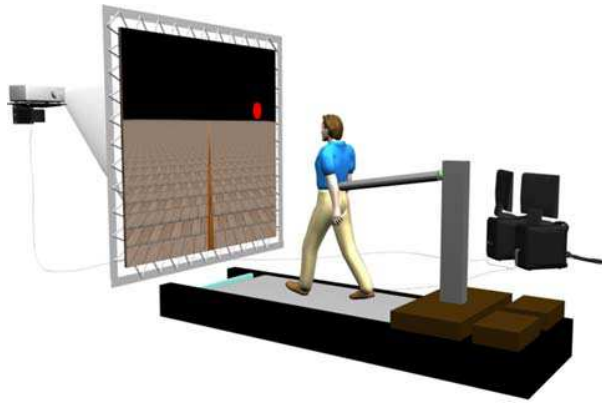


Figure 29 : Overview of the virtual reality set-up and the visual scene that was projected onto the screen in front of participants.

Experimental procedure

Before the experimental session, the initial velocity of the moving belt was individually adjusted until participants reported a subjective feeling of an easy walking pattern. The participant's eye height with regard to the screen was also customized before the experiment. Once the participant stood on the treadmill, we measured his or her eye height and used this measure to compute the visual scene. At the start of each trial, participants were required to stabilize their walking speed between 1.15 and 1.25 m/s. To do so, a visual gauge was displayed on the projection screen, consisting of a vertical white line of 0.3 m representing the current velocity and a rectangular zone representing a velocity interval centered on 1.2 m/s. To satisfy the initial task requirements, the line had to be kept within the prescribed rectangular zone. When the prescribed velocity was maintained for 500 ms, the gauge disappeared and the trial began. The balls, which moved at eye height, had to be intercepted at the moment at which they crossed the displacement axis. To achieve this, participants regulated their walking speed, when deemed necessary, so as to be at the interception point at the right time (5 s after the balls appeared). Qualitative visual feedback was given: a green square was displayed at the end of successful trials and a red square at the end of unsuccessful trials. A trial was considered successful if the distance between the centers of the virtual ball and the participant's head was less than 0.3 m at the moment at which the ball reached the interception point.

Independent variables

We manipulated the ball offset (three modalities), the curvature of the ball path (three modalities), and the display condition of the ball path (two modalities). The three offset conditions (i.e., different starting positions of the ball) were used in order to change the position at which the balls crossed the displacement axis (see Figure 30A). These positions were computed on the basis of the initial walking speed (1.2 m/s). In the absence of accelerations or decelerations, the balls would make contact with the head in the 0-m offset condition, pass 2-m in front of the head in the 2 m offset condition, and pass 2-m behind the head in the -2-m offset condition. The reason for manipulating the offset was to force participants to produce different displacement regulations and to prevent them from locating the place of arrival of the balls too easily.

As also shown in Figure 30A, the balls approached along a rectilinear path (no curvature condition) or a curvilinear path (positive and negative curvature conditions; cf., Bastin et al., 2006b). In the curvilinear conditions, a constant curvature of $\pm 0.2 \text{ m}^{-1}$ was achieved by making the ball move along (a portion of) an imaginary circle with a radius of 5 m, passing through the departure and arrival points of the ball. In half of the trials, the ball-path-displayed condition, the ball path was depicted in the virtual environment (see Figure 30B). This was achieved by displaying a 0.2 m wide stripe 0.4 m below the ball path throughout the trial duration. Preliminary tests had indicated that such a stripe allows participants to better discriminate ball path characteristics (i.e., curvature and place of arrival). Positioning the stripe on the floor was found to be less effective. In the remaining trials, the ball-path-not-displayed condition, the ball approached without its path being depicted in the virtual environment.

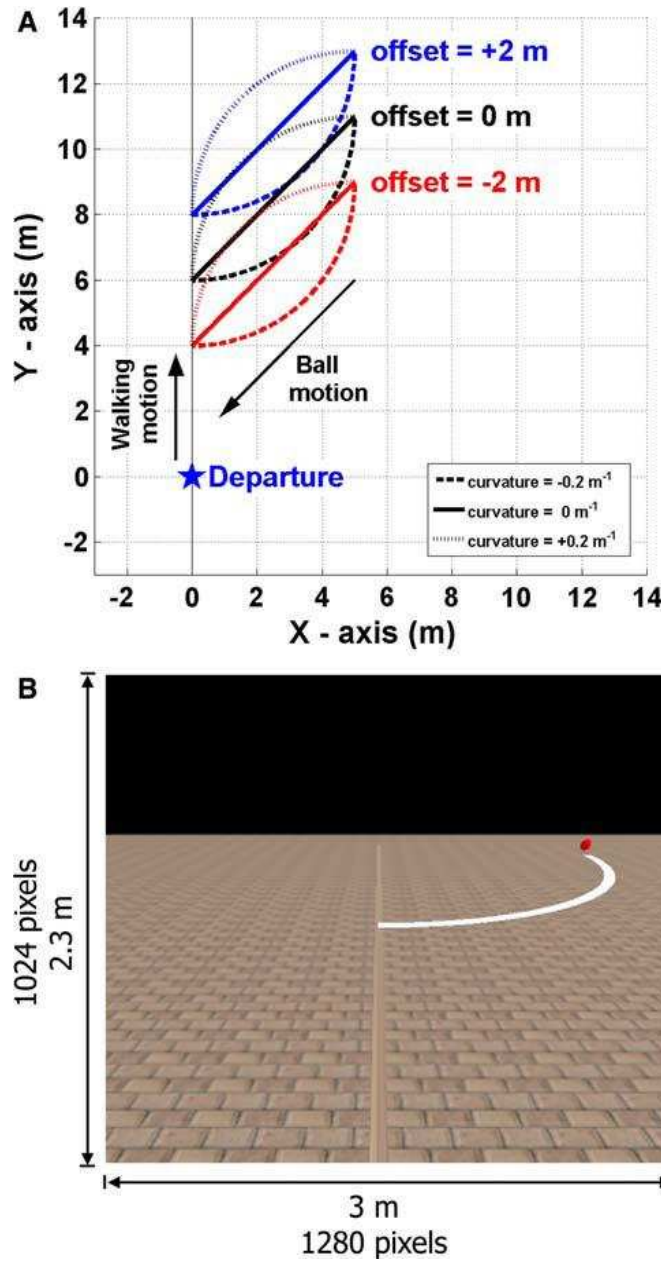


Figure 30 : (A). Bird's eye view of the displacement axis and the different ball trajectories. Participants' displacements were constrained along the Y-axis. The ball followed a rectilinear path (curvature = 0 m^{-1}) or one of two curvilinear paths (curvature = -0.2 and $+0.2 \text{ m}^{-1}$). The X-coordinate of the starting position of the ball was always 5 m. The Y-coordinate of this position was 9, 11, and 13 m, for the -2 , 0 , and $+2 \text{ m}$ offset conditions, respectively. The Y-coordinate of the interception point was 4, 6, and 8 m, for the -2 , 0 , and $+2 \text{ m}$ offset conditions. (B). The visual scene and the display of the ball track as seen from the perspective of participants. The display consisted of a white stripe positioned 0.40 m below the path followed by the ball.

The 18 experimental conditions ($2 \text{ display conditions} \times 3 \text{ offsets} \times 3 \text{ curvatures}$) were repeated 5 times each, giving rise to a total of 90 trials that were presented in a random order. A 5-min rest was given after 45 trials. Before the experiment, participants performed 36 training trials. Two repetitions of the 18 experimental conditions were used in the training session. The whole experiment lasted approximately 1 h.

Data analysis and dependent variables

The analyses focused on performance, on the walking kinematics, and on the explanatory value of the candidate perceptual-motor strategies.

Performance

We used success rate (SR) and final spatial error or constant error (CE) to assess participants' performance. SR was computed in two different ways. A trial was deemed successful if the Euclidian distance between the center of the head and the center of the ball was reduced to less than 0.3 m (1) at the moment at which the ball crossed the axis of displacement (i.e., 5 s after the ball appearance) or (2) at any moment during the trial. SR was calculated as the percentage of successful trials relative to the total number of trials. The CE was calculated as the average signed distance along the Y-axis between the center of the head and the center of the ball at the moment at which the ball crossed the axis of displacement.

Kinematics

The analyses of the walking kinematics were based on the position-time series (sampled at 200 Hz) for each experimental trial of each participant. We used a forward and backward second order low-pass Butterworth filter with a cut off frequency of 10 Hz. The time series were averaged over intervals of 500 ms (corresponding approximately to one step; for a similar methodology, see Bastin et al., 2006b, and Warren et al., 2001), with data being synchronized at the moment at which the center of the target crossed the participant's axis of displacement. The main analyses focused on how participants modified their walking speed in the different experimental conditions.

Additional analyses were performed to ensure that the observed kinematics reflected on-line regulations and not pre-programmed responses to the different target distances. To achieve this, we computed the within-subjects variability in walking speed and current error for each interval of 500 ms. The current error is the theoretical error that would be observed at the interception point in the absence of further accelerations and decelerations. An increase in walking-speed variability indicates on-line regulations of walking speed, and a concomitant convergence of the current error towards zero implies that the observed regulations were

adaptive (Camachon, Buekers, & Montagne, 2004; Chardenon et al., 2002; Montagne, Buekers, Camachon, de Rugy, & Laurent, 2003).

Perceptual-motor strategy

Two types of analyses were performed to test which perceptual-motor strategy was involved. First, to reveal the possible operation of a CBA strategy, we examined the time course of the bearing angle (see also Bastin et al., 2006b). A bearing angle that remains approximately constant during the course of a trial would be in agreement with a CBA strategy. Likewise, to reveal the possible operation of an MRV strategy, we examined the time course of the difference between the required behavior to succeed in the task and the current behavior ($\dot{Y} \times TTC - [Y - Y_{IP}]$; look back to Equation 3). These analyses are similar to the ones used by Peper et al. (1994) and Montagne et al. (1999).

Subsequent analyses compared the observed and predicted kinematics. The observed kinematics (walking speeds) were averaged for each experimental condition of each participant, hence removing the intra-participant variability over the five repetitions of the trials. The predicted kinematics were obtained by numerically solving Equations. 1 and 2. The best-fitting parameters (the k_1 s and k_2 s of the respective models) were determined for each model and each participant, using the same parameters for the different experimental conditions. For the CBA model, k_1 and k_2 were varied from -0.1 to -0.01 in increments of 0.01; for the MRV model these parameters varied from 0.1 to 2 in increments of 0.2. Hence, 100 combinations of parameter values were used for both models. The predictions of the models and the observed data were compared with the um of squares error (SSE), using the complete trajectories with the exception of the last 0.5 s.⁶

Statistics

Repeated measures ANOVAs were used to analyze performance (SR and CE), walking speed, and the robustness of the perceptual-motor strategies (SSE). Partial effect sizes were computed (η_p^2) and post hoc comparisons were conducted using HSD Tukey tests. The p

⁶ We did not use the final .5 s of the trajectories because the walking speed changes predicted by the CBA model are unrealistic for very near targets, especially in the -2 m offset condition.

value for statistical differences was set at 0.05. All 90 trials (successful and unsuccessful) were used in the analyses.

Predictions

The considered MRV model is based, among other things, on the place of arrival of the ball. Because the place of arrival is the same for different curvatures of ball path, the MRV model predicts that the curvature manipulations do not affect the participants' behavior. On the other hand, the bearing angle is affected by the trajectory curvature and, hence, the CBA strategy does predict effects of curvature manipulations. These effects are most clearly illustrated in the 0-m offset condition, in which no changes in walking speed are required to intercept the ball. In this condition, when the trajectory curvature is positive, a constant walking speed gives rise to a decrease in bearing angle (and thus to a negative rate of change). The use of a CBA strategy therefore predicts an initial increase in walking speed. Such an increase would result in an increase in bearing angle in the second part of the trial, and as a consequence to a decrease in walking speed in the later part of the trial. The predictions of the CBA strategy for a negative curvature are the opposite of those for a positive curvature. With regard to the display of the ball path, we expect that the ball-path-displayed condition facilitates the perception of the place of arrival of the ball. Since the place of arrival serves as input to the MRV model, we expect that the MRV model might be used more frequently in the ball-path-displayed condition than in the ball-path-not-displayed condition. Relating this to the previous arguments, an interaction between the curvature and display manipulations is predicted. Namely, the effect of curvature is predicted to be more pronounced in the not-displayed condition because the MRV strategy might be used less frequently in that condition.

RESULTS

Performance

Figure 31A presents the SRs, computed in two ways. We first considered SR computed with trials in which the Euclidian distance between the agent and the ball was reduced to less than 0.3 m at the moment at which the ball crossed the participant's displacement axis (plain bars). This criterion indicated that participants intercepted the balls in 58% of the trials, on

average. They achieved better interception scores in the ball-path-displayed condition than in the not-displayed condition (71 vs. 45%), and also in the rectilinear and negative curvature conditions as compared to the positive curvature condition (71 and 71% vs. 32%). In experiments reported by Bastin et al. (2006a, b) and by Diaz, Phillips et Fajen (2009), however, negative curvatures led to less accurate performance than positive curvatures. To analyze this apparent difference with our results we also computed SR with the trials in which the distance between the agent and the ball was reduced to less than 0.3 m during the overall trial course (dotted bars). This analysis revealed that interceptions occurred in more than 90% of the trials.

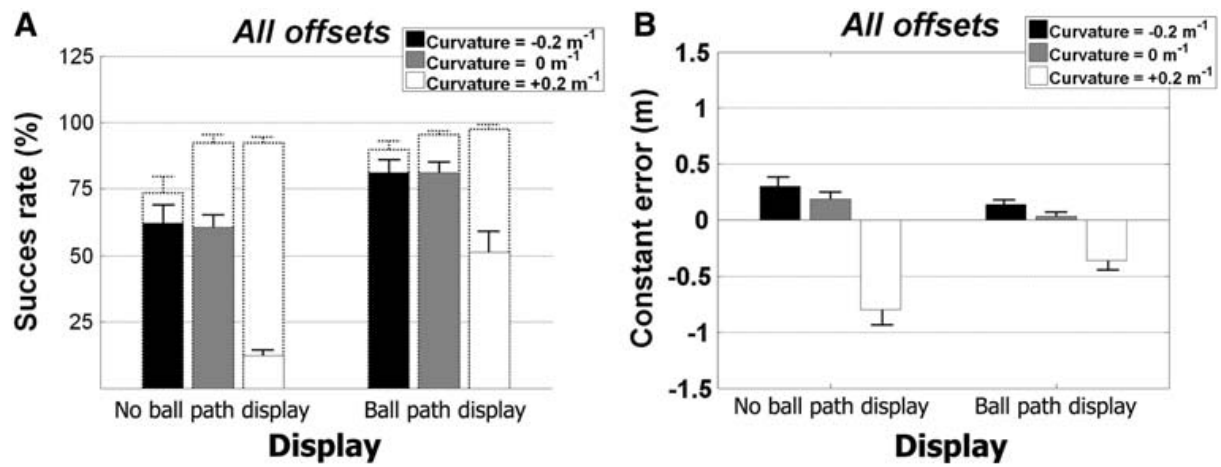


Figure 31 : Average success rate (A) and constant error (B) as a function of ball path curvature and ball path display. Two computations of success rate are displayed in A. The plain bars depict the success rate computed from the agent-ball distance at time $t=5$ (s). The additional dotted bars represent the success rate computed from the minimum of the agent-ball distance across the overall time-course of the trial. Vertical bars depict the standard error of the individual means.

A two-way repeated measures ANOVA (2 display conditions $\times$ 3 curvatures) with SR (computed with the latter definition) as dependent variable revealed significant main effects of display condition ($F_{(1, 12)} = 20.69, p < .05, \eta^2_p = 0.63$) and curvature ($F_{(2, 24)} = 10.60, p < .05, \eta^2_p = 0.47$) but no significant interaction ($F_{(2, 24)} = 3.10, p > .05, \eta^2_p = 0.21$). A *posteriori* comparisons revealed that participants performed better in the ball-path-displayed condition than in the not-displayed condition (94 vs. 86%), and also in the rectilinear and positive curvature conditions as compared to the negative curvature condition (94 and 95% vs. 81%). The larger number of misses observed in the negative curvature condition is probably due to the fact that this measure accepts as successful interceptions that could have occurred up to 0.30, 0.42 and 1.76 m behind the point at which

the ball crossed the displacement axis, for negative, rectilinear and positive curvatures, respectively. This means that the interception window is smaller in the negative curvature condition than in the other curvature conditions (see Figure 32).

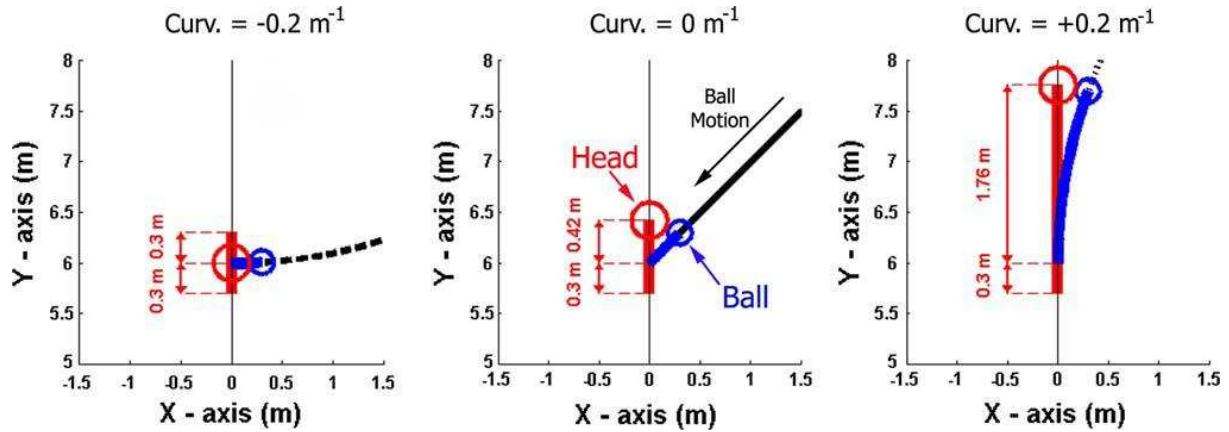


Figure 32 : Interception windows for negative, rectilinear and positive curvatures. The parts of the ball trajectories and the participant's locations from which the ball can be intercepted are indicated with thick blue and red lines. Interception could occur 0.30 m before the point at which the ball crossed the displacement axis and up to 0.30, 0.42 and 1.76 m behind this point, for negative, rectilinear and positive curvatures, respectively.

Figure 31B presents the CEs. A two-way repeated measures ANOVA (2 display conditions $\times$ 3 curvatures) on the CEs revealed a significant main effect of curvature ($F_{(2, 76)} = 66.61, p < .05, \eta^2_p = 0.64$) and a significant interaction ($F_{(2, 76)} = 19.15, p < .05, \eta^2_p = 0.34$). The CEs confirm that participants took advantage of the spatial interception windows. Indeed, a *posteriori* comparison revealed that the CE in the positive curvature condition was different from the errors for the other curvatures; with positive curvatures, participants arrived early at the interception point (negative errors), whereas they arrived slightly late at the interception point in the other curvature conditions (positive errors). The interaction indicates that the effect of curvature was more pronounced when the ball path was not depicted on screen.

Kinematics

Figure 33 presents the average walking speeds for the different experimental conditions. The same pattern of results is apparent for the different offset conditions. Let us first consider the condition without a visible ball path (upper panels). In the first part of the trials, the walking speeds in the positive curvature condition (filled triangle symbols) are higher than the

walking speeds in the rectilinear condition (filled square symbols) which, in turn, are higher than the walking speeds in the negative curvature condition (filled circle symbols). Opposite effects can be observed in the final part of the trials. In the condition with a visible ball path (lower panels), the differences between the curves are less pronounced. Hence, the curvature manipulations seemed to have a larger effect in the absence of the visible path.

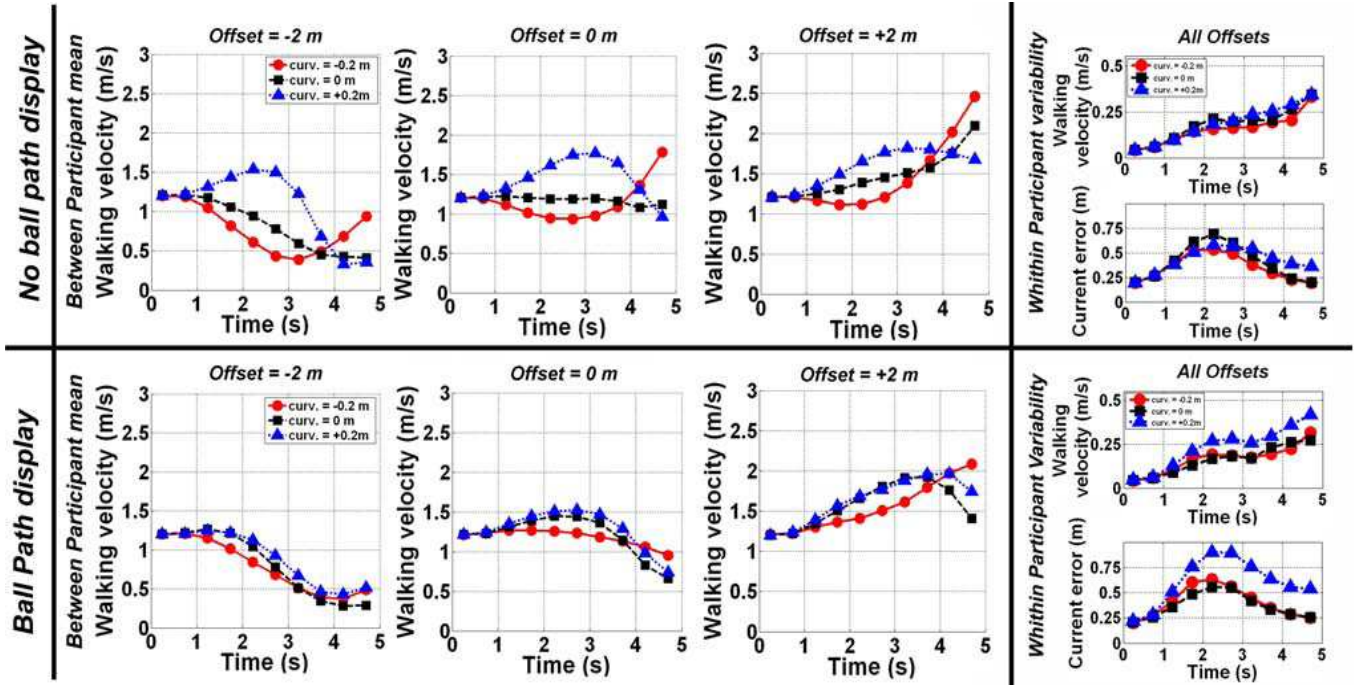


Figure 33 : The time course of the average walking speed as a function of the target offset, the ball path display, and the ball path curvature (filled circle symbols depict the negative, filled triangle symbols the rectilinear, and filled square symbols the positive curvature conditions). The right column shows the within participant variability of walking speed and current error averaged for all target offsets as a function of curvature.

To test these effects we performed a three-way repeated measures ANOVA (2 display conditions $\times$ 3 curvatures $\times$ 10 time intervals) with walking speed as dependent variable for each offset condition. Let us describe the results for the 0 m offset condition. This analysis revealed significant main effects of display condition ($F_{(1, 12)} = 12.63, p < .05, \eta^2_p = 0.51$), Curvature ($F_{(2, 24)} = 44.32, p < .05, \eta^2_p = 0.79$), and time interval ($F_{(9, 108)} = 6.30, p < .05, \eta^2_p = 0.34$). We also found significant interactions between display condition and time interval ($F_{(9, 108)} = 16.92, p < .05, \eta^2_p = 0.58$), display condition and curvature ($F_{(2, 24)} = 23.07, p < .05, \eta^2_p = 0.66$), curvature and time interval ($F_{(18, 216)} = 20.20, p < .05, \eta^2_p = 0.63$), and between Display Condition, Curvature, and Time Interval ($F_{(18, 216)} = 9.96, p < .05, \eta^2_p = 0.45$). Most interestingly, post hoc analyses performed

on this last interaction revealed that the time course of walking speed was affected differently by the curvature manipulations depending on the presence (or not) of a ball-path display. The statistical results for the other offset conditions were similar (see Table 1). Overall, the ANOVAs confirmed the trends previously observed in Figure 33.

Table 1

Results of the ANOVAs performed on the walking-speed profiles for each offset condition (-2, 0 and +2 m).

	Offset = -2m		Offset = 0 m		Offset = +2m	
Effect	ANOVA	η^2_p	ANOVA	η^2_p	ANOVA	η^2_p
Ball-path-display	$F_{(1, 12)} = 10.40, p < .05^*$	0.57	$F_{(1, 12)} = 12.63, p < .05^*$	0.51	$F_{(1, 12)} = 30.68, p < .05^*$	0.72
Curvature	$F_{(2, 24)} = 77.76, p < .05^*$	0.77	$F_{(2, 24)} = 44.32, p < .05^*$	0.79	$F_{(2, 24)} = 5.88, p < .05^*$	0.33
Time interval	$F_{(9, 108)} = 76.20, p < .05^*$	0.33	$F_{(9, 108)} = 6.30, p < .05^*$	0.34	$F_{(9, 108)} = 63.96, p < .05^*$	0.84
Ball-path-display × time interval	$F_{(9, 108)} = 2.75, p < .05^*$	0.64	$F_{(9, 108)} = 16.92, p < .05^*$	0.58	$F_{(9, 108)} = 9.74, p < .05^*$	0.03
Ball-path-display × curvature	$F_{(2, 24)} = 26.19, p < .05^*$	0.59	$F_{(2, 24)} = 23.07, p < .05^*$	0.66	$F_{(2, 24)} = .32, p > .05$	0.05
Curvature × time interval	$F_{(18, 216)} = 40.30, p < .05^*$	0.64	$F_{(18, 216)} = 20.20, p < .05^*$	0.63	$F_{(18, 216)} = 20.21, p < .05^*$	0.63
Ball-path-display × curvature × time interval	$F_{(18, 216)} = 21.51, p < .05^*$	0.46	$F_{(18, 216)} = 9.96, p < .05^*$	0.45	$F_{(18, 216)} = 8.75, p < .05^*$	0.42

The differences between the speed profiles in the absence of a ball-path display are consistent with the operation of a CBA strategy, and the reduction of the differences between the speed profiles in the presence of a visible ball path indicates the operation of a strategy that relies on the place of arrival of the ball, such as an MRV strategy that includes predictive information. The predictive values of the CBA and MRV strategies are addressed in-detail in the next section. However, we first consider the within-participants variability in walking speed and current error (Figure 33, right column). The figure shows a gradual increase in walking-speed variability in the two display conditions. The current error variability increases until 2.5 s and then decreases until interception. As expected, this variability pattern suggests functional regulations of walking speed due to on-line perception-action corrections. Note that these variability patterns of walking velocity and current error occurred even when the ball

path was visible, hence ruling out the possibility that participants used a purely open-loop strategy also in this condition.

Perceptual-motor strategy

Figure 34 presents the time course of a quantity related to the MRV model (upper panels) and of the bearing angle (lower panels), for one representative participant. The quantity related to the MRV model (look back to Equation 3) converges toward zero earlier and more in the ball-path-displayed condition (right panel, on top) than in the condition without the path display (left panel, on top), indicating the operation of an MRV strategy only in the presence of a visible ball path. The time course of the bearing angle is plotted along with the time course of the bearing angles that would have occurred if participants had maintained a constant walking speed, assuming that they adopted the speed that would lead them to intercept the balls. Without a visible ball path, the observed bearing angles deviate from the hypothesized constant speed bearing angles well before the end of the trials, and the deviations are in the direction of keeping the bearing angle constant. Such adaptations are less pronounced or even absent in the condition in which the path is displayed. This is consistent with the operation of a CBA strategy in the presence of a visible ball path.

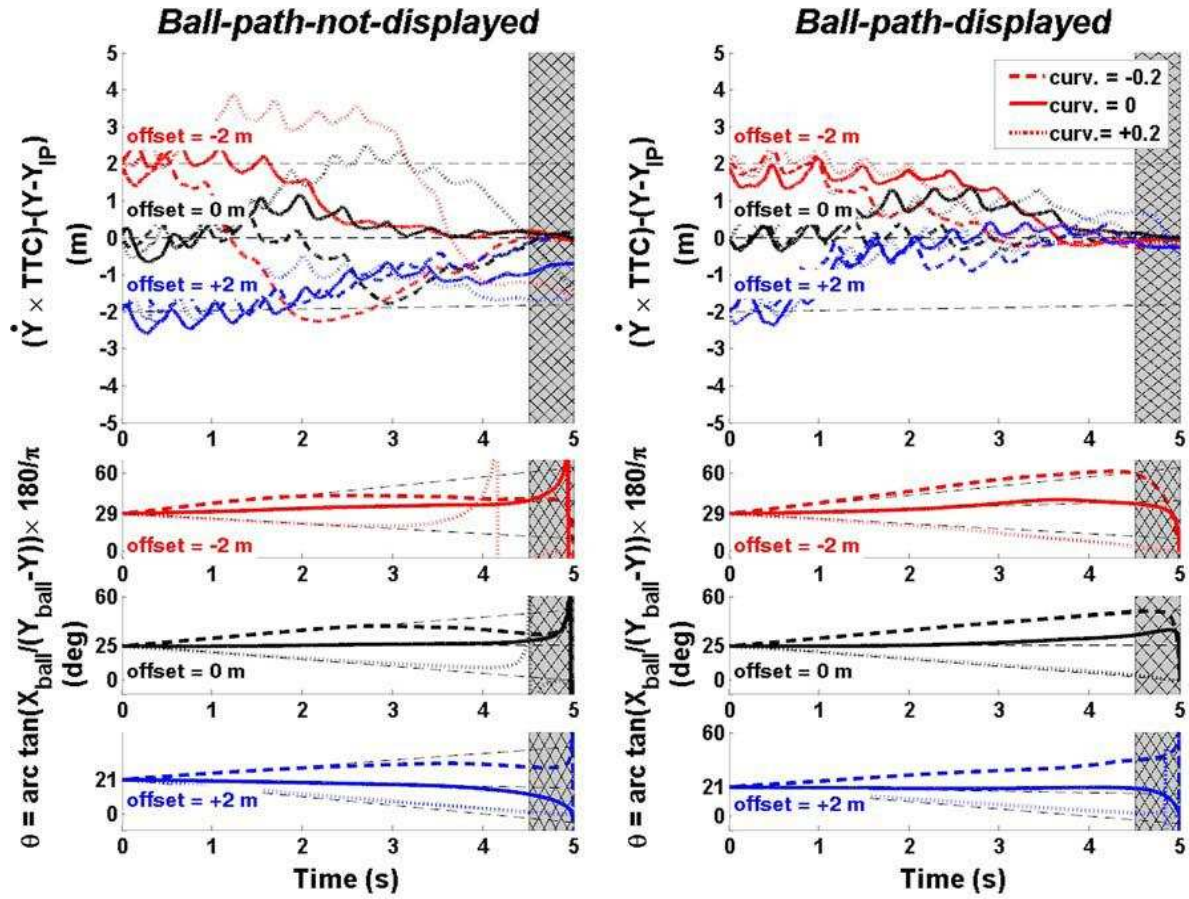


Figure 34 : The raw-data time course, for a representative participant, of the quantity $\dot{Y} \times TTC - (Y - Y_{ip})$ and of the bearing angle as a function of target path curvature, target offset, and ball path display (*left panel, ball-path-not-displayed condition; right panel, ball-path-displayed condition*). *Top panels* display the quantity $\dot{Y} \times TTC - (Y - Y_{ip})$ which represents the difference between the distance that would be traveled if the participant would maintain the current velocity unchanged until contact and the current distance from the participant to the interception point. Higher frequency components correspond to increases and decreases of the walking speed due to footsteps. *Lower panels* depict the time course of the recorded bearing angle that is plotted along with the time course of the theoretical bearing angles (*straight lines*) that would have occurred in the absence of changes in the optimal velocity required to intercept the ball (0.8, 1.2 and 1.6 m/s for the offset -2, 0 and +2 m, respectively). The hatched gray area depicts the last 0.5 s of the trials, in which bearing angle display display chaotic changes for near targets.

Figure 35 illustrates the walking kinematics for the entire group of participants, along with the numerical simulations of the candidate models, for the 0-m offset condition. The gray area in the figures is the area between the average walking speed plus and minus one standard deviation. The best-fitting predictions of the CBA and MRV models are represented by the dotted and solid curves, respectively. Overall, the dotted curves (CBA) seem to approximate the gray area better than the solid curves (MRV) in the ball-path-not-displayed condition (upper panels), whereas the solid curves approximate the gray area better in the ball-path-displayed condition (lower panels). Hence, the CBA strategy seems to be of better

explanation of the walking kinematics in the condition without visible ball path, whereas the MRV strategy seems to be of better explanation in the condition with a visible ball path.

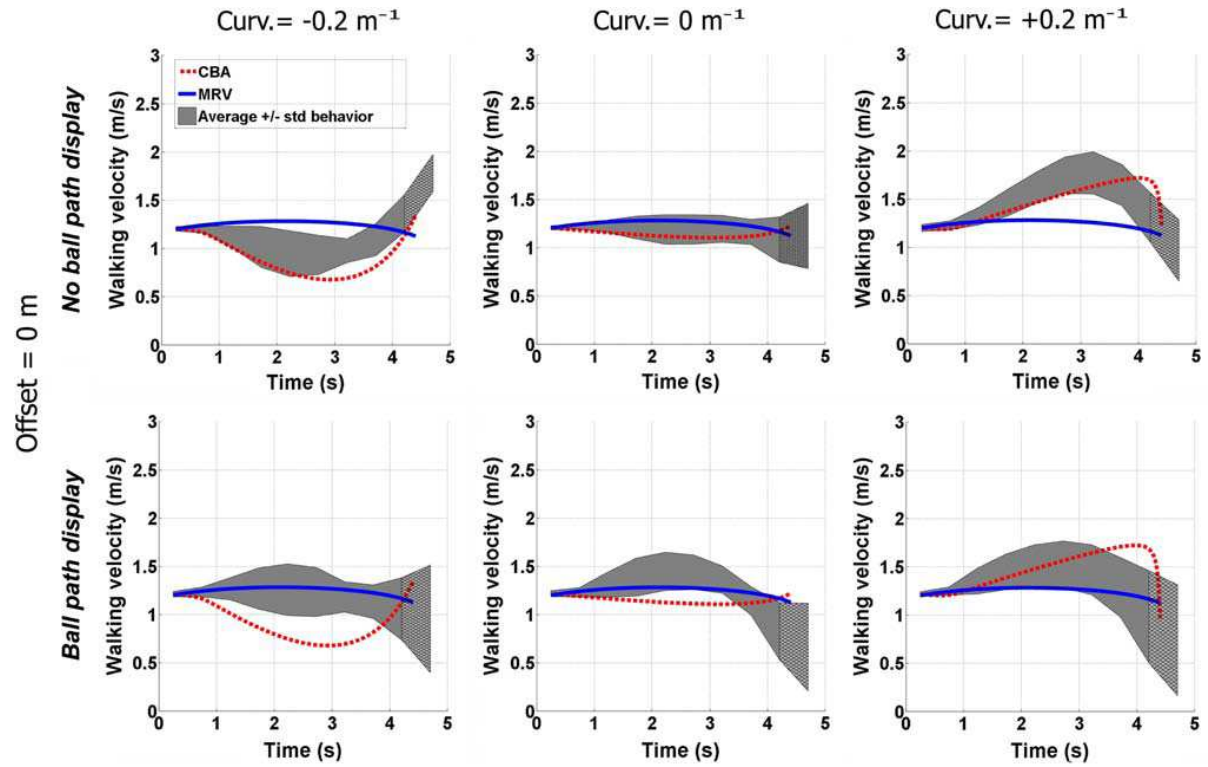


Figure 35 : Average observed walking speeds for the entire group of participants ($n=13$) and the best-fitting numerical simulations of the average observed walking speed provided by the CBA and MRV models, as a function of ball path curvature and display condition, for the 0 m offset condition. The upper and lower bounds of the gray area are the average observed walking speed $\pm$ one standard deviation. The hatched part of this area depicts the last 0.5 s of the trials, which was not used for the simulations. CBA numerical simulations are depicted with a dotted line and MRV simulations with a solid line.

To test these results, a two-way repeated measures ANOVA (2 display conditions $\times$ 2 models) was performed on the SSE values obtained by fitting the two models to the observed kinematics. The ANOVA revealed a significant main effect of display condition ($F_{(1, 12)}=8.63$, $p<.05$, $\eta^2_p = 0.37$), a significant main effect of model ($F_{(1, 12)}=7.18$, $p<.05$, $\eta^2_p = 0.42$), and a significant interaction ($F_{(1, 12)} = 34.81$, $p<.05$, $\eta^2_p = 0.74$).

The interaction is illustrated in Figure 36. Post hoc tests revealed that whereas the errors for the CBA model were smaller in the ball-path-not-displayed condition than in the ball-path-displayed condition (0.77 vs. $1.57 \text{ m}^2/\text{s}^2$), the opposite was true for the MRV model (1.19 vs. $.70 \text{ m}^2/\text{s}^2$). This confirms the trends previously illustrated in Figure 34 and Figure 35. The SSE values of the individual participants and the best-fitting parameters are presented in Table 2.

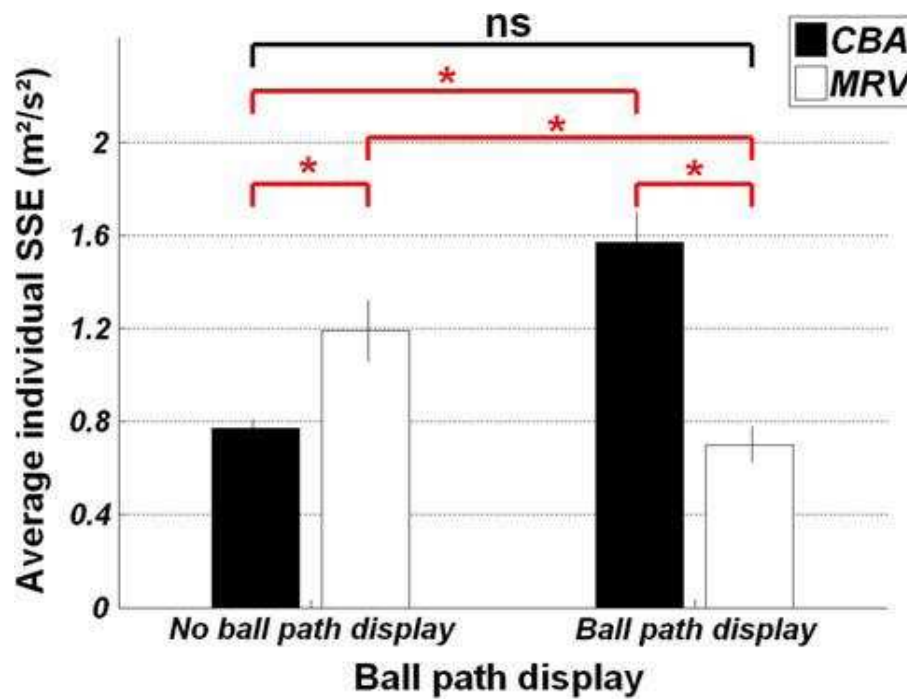


Figure 36 : Average individual values ($n = 13$) of the sum of squares error (SSE) obtained from comparisons between individual walking-speed profiles and the numerical simulation of the CBA and MRV models for the different display conditions. The vertical bars depict the standard errors of individual means. Asterisk indicates statistical difference (post hoc Tukey's HSD test, $p < 0.05$), whereas "ns" indicates the absence of a statistical difference ($p > 0.05$).

Table 2

Sum of squares error (SSE, in m/s) expressing the quantitative fit of CBA and MRV models to the observed kinematics and the average best-fitting parameters for each model in the two display conditions for each participant (n = 13).

Display	Participants	Laws of control					
		CBA			MRV		
		SSE	k_1	k_2	SSE	k_1	k_2
No ball path display	1	0.97 ± 1.38	-0.05	-0.03	1.13 ± 0.96	0.90	1.30
	2	0.81 ± 1.2	-0.05	-0.04	1.1 ± 0.73	1.10	1.30
	3	0.67 ± 0.88	-0.05	-0.03	0.74 ± 0.33	0.70	1.10
	4	0.78 ± 1.18	-0.06	-0.03	1.36 ± 1.16	0.90	1.30
	5	0.91 ± 1.08	-0.04	-0.04	0.4 ± 0.33	0.50	1.10
	6	0.55 ± 0.63	-0.06	-0.03	1.02 ± 0.79	0.90	1.30
	7	0.79 ± 1.21	-0.03	-0.03	1.06 ± 0.82	1.10	1.30
	8	0.81 ± 1.05	-0.03	-0.03	0.83 ± 0.72	1.10	1.10
	9	0.56 ± 0.6	-0.06	-0.02	2.22 ± 1.77	1.10	1.50
	10	0.72 ± 0.69	-0.07	-0.03	1.57 ± 1.54	1.10	1.30
	11	0.84 ± 0.74	-0.06	-0.03	1.25 ± 0.97	0.90	1.30
	12	0.97 ± 1.54	-0.05	-0.03	0.97 ± 0.8	0.90	1.30
	13	0.62 ± 0.76	-0.08	-0.05	1.78 ± 1.49	1.10	0.90
	Mean	0.77	-0.05	-0.03	1.19	0.95	1.24
	Std	0.14	0.01	0.01	0.47	0.19	0.15
Ball path display	1	1.73 ± 1.85	-0.05	-0.03	0.68 ± 0.43	0.90	1.30
	2	1.49 ± 1.52	-0.05	-0.04	0.51 ± 0.48	1.10	1.30
	3	0.64 ± 0.83	-0.05	-0.03	0.84 ± 0.54	0.70	1.10
	4	1.71 ± 1.15	-0.06	-0.03	0.57 ± 0.28	0.90	1.30
	5	1.09 ± 1.09	-0.04	-0.04	0.18 ± 0.1	0.50	1.10
	6	1.57 ± 1.14	-0.06	-0.03	1.01 ± 0.73	0.90	1.30
	7	1.63 ± 1.44	-0.03	-0.03	0.82 ± 0.62	1.10	1.30
	8	1.22 ± 1.32	-0.03	-0.03	0.46 ± 0.35	1.10	1.10
	9	2.17 ± 1.34	-0.06	-0.02	1.3 ± 1.1	1.10	1.50
	10	2.51 ± 1.38	-0.07	-0.03	0.74 ± 0.38	1.10	1.30
	11	1.5 ± 1.56	-0.06	-0.03	0.89 ± 0.91	0.90	1.30
	12	1.61 ± 1.72	-0.05	-0.03	0.5 ± 0.42	0.90	1.30
	13	1.59 ± 2.72	-0.08	-0.05	0.58 ± 0.59	1.10	0.90
	Mean	1.57	-0.05	-0.03	0.70	0.95	1.24
	Std	0.46	0.01	0.01	0.28	0.19	0.15

DISCUSSION

The aim of this study was to determine to what extent environmental constraints affect the selection of control strategies. More precisely, we set out to study whether the informational content of a visual scene affects which control law is selected by participants who control their forward walking speed in order to intercept approaching targets. We manipulated the curvature and display conditions of the ball trajectories. On the basis of previous research, it was hypothesized that perceivers would use a strategy that relies upon prospective information (the CBA strategy) in the absence of a ball-path display. It was further hypothesized that displaying the ball trajectories would allow participants to integrate predictive spatial information as predicted by an MRV control law.

CBA versus MRV strategies

In the absence of a ball-path display, differences in the curvature of the target trajectory give rise to differences in the walking-speed profiles. This indicates the operation of a CBA strategy. For example, in the 0-m offset condition, in which a constant speed is sufficient for interception, a positive curvature goes together with a decrease in bearing angle and a corresponding increase in walking speed. This increase in walking speed gives rise to an increase in bearing angle in the second part of the trial, which is accompanied by a decrease in walking speed close to target contact. Also in the absence of a path display, negative curvatures were found to have the opposite effect on the walking speeds, again as predicted by the CBA strategy.

This support for the CBA strategy is consistent with previous results (e.g., Bastin et al., 2006b, 2008). The main interest of our study, however, lies in the condition with the display of the target path. In this condition, the velocity profiles obtained for different curvatures are more difficult to distinguish. If we focus on the 0-m offset condition, the velocity profiles obtained in the negative curvature condition are still slightly different from the other ones, but the speed modifications do not match the predictions of the CBA strategy anymore. Rather, the results seem to call for the operation of a strategy based (at least partly) on predictive information.

These findings are confirmed by the quantitative fits between the candidate models and the observed speed modifications. In the absence of a path display, the CBA strategy provides

a better account of the speed modifications than the MRV model. In contrast, in the presence of the display, the MRV model provides a better account of the kinematics. Hence, assuming that our laboratory results generalize to more natural environments, we conclude that observers use different control laws in different situations.

Optical correlates for the MRV model

The formulation of the MRV strategy presented in Equations 2 and 3 is based on physical variables. Obviously, the strategy is viable only if perceptual correlates of these variables exist. Let us address this question before we discuss our results in a broader context. The issue related to the perception of the speed of rectilinear self-motion ($\dot{Y}$ in Equation 2) is well documented. Several optical variables including global optic flow rate (GOFR) and edge rate (ER) have been shown to be useful in this regard; it has been argued that these optical variables are used simultaneously for the perception of self-motion (Larish & Flach, 1990) and the control of goal-directed actions (Fajen, 2005b). Hence, even though the relative contribution of each variable seems to depend on the task at hand, there is evidence in favor of the use of GOFR and ER.

The required velocity ($\dot{Y}_{req}$ in Equations 2 and 3) is a composite variable that includes the current distance to the interception point and the time remaining before the ball reaches the interception point. Several candidate variables can be considered as information about distance. The height of the interception point in visual field might appear to be one of them (e.g., Ooi, Wu, & He, 2001). The ball path, however, was displayed as a stripe just below the ball (i.e., above the ground plane), which means that the use of this optical variable would have led to an overestimation of the current distance. Even so, it remains possible that the practice trials allowed participants to adapt to this discrepancy between the actual and specified distance. Alternatively, participants might have used variables in the changing optic flow that specify the distance to objects (not necessarily on the ground surface) in units of eye-height or stride length (e.g., Equations 2 and 4 in Warren, 2007; cf., Lee 1974). Distance in units of stride length, for example, is specified by the ratio of the *tau*-value of the object to the duration of a stride.

A final optical specification that is necessary for the MRV strategy to be viable is the specification of time to contact. This issue is not trivial among other reasons because *tau* (Lee & Reddish, 1981; cf. Bootsma & Oudejans, 1993) does not provide reliable estimates of time

to contact for approaches on curved trajectories, as in the present study. Nevertheless, Kerzel, Hecht et Kim (2001) showed that participants are able to accurately judge time to contact even in the case of curved trajectories. In their study, the judgments of participants seemed to be based on optical velocity changes. Altogether, the perceptual support for the physical quantities involved in the MRV strategy indeed seems to exist. Further experiments are required to test the optical basis of the strategy.

Efficiency, flexibility, and lawfulness

Why would perceivers select a strategy that involves predictive information in the presence of the ball path display? After all, one of the main advantages of the prospective CBA strategy is that it remains available independently of environmental constraints; as soon as the ball is visible, the strategy can be used (Bastin & Montagne, 2005). One might hypothesize that the use of a strategy that involves predictive information (the MRV strategy) is due to an efficiency principle. Even though the CBA strategy allows perceivers to get to the right place at the right time, in some cases, it gives rise to unnecessary adaptations in walking speed. Such unnecessary adaptations are illustrated by the effects of curvature in the 0-m offset condition, in which the targets can also be intercepted without any changes in walking speed. The MRV strategy minimizes unnecessary adaptations.

However, in the absence of sufficiently precise predictive information, or if the predictive information is difficult to detect, the use of strategies that involve predictive information might involve larger risks. In such circumstances, errors in the detection of predictive information might lead to unsatisfactory performance. In the condition without a path display, which was less informationally rich, participants appeared to avoid these errors by the use of the prospective strategy. In short, participants in our experiment showed the capacity to select the type of control that takes advantage of the information that happens to be available in the visual scene, while maintaining high levels of performance throughout the experiment.

A number of recent studies provide further evidence for this apparent plasticity of the perceptual-motor organization. For example, various studies have shown how the combination of several (redundant) perceptual variables within a single law of control provides a robust and adaptive control mechanism (e.g., Bastin et al., 2006a; Bruggeman, Zosh, & Warren, 2007; Warren et al., 2001; Wilkie & Wann, 2003; Wilkie & Wann, 2005). Our results reveal that this flexibility also occurs at the level of the laws of control; several

control strategies take part in the perceptual-motor organization. Given the flexible organization of perception-action systems, then, a major challenge for scientists becomes to discover lawfulness in this flexibility.

CONCLUSION

Although the CBA and MRV strategies provided reasonably good fits, part of the observed changes in walking speed could not be explained. Let us briefly consider three possible ways in which the predictions might be improved. First, the individual control laws might be optimized, more like the way in which we modified the original RV model (Peper et al., 1994). Second, the considered control laws could be merged into a higher-order architecture that depends on one or more additional parameters (Warren et al., 2001). This would be equivalent to creating a continuous space and each point of which represents a control law. Selecting a control law then means selecting a locus in the control-law space (the action-equivalent of the notion of information space; e.g., Jacobs, Silva, & Calvo, 2009). A third possibility can be found in the suggestion that agents regulate their movement to achieve optical states (i.e., a constant bearing angle) at some point in the future (Diaz et al., 2009), perhaps with less predictable environments leading to temporally nearer control and more predictable environments to more temporally distant control.

CHAPITRE 2 : L'interception et ses lois de contrôle

2. Quelles informations pour réguler les déplacements ?

2.1. Le contrôle visuel de la locomotion

The visual control of walking velocity⁷

ABSTRACT

Even if optical correlates of self-motion velocity have been already identified, their contribution to the control of displacement velocity remains to be established. In this study, we used a virtual reality display coupled to a treadmill to test the role of both Global Optic Flow Rate (GOFR) and Edge Rate (ER) when controlling self-motion velocity in an active locomotion task. Participants were asked to walk at a constant velocity, corresponding to their preferred walking velocity, while GOFR and ER were biased by manipulating respectively eye height and texture density. Results show that these sources of information are indeed used by the participants to control walking speed, as illustrated by a slowing down of locomotion pace in the case the displacement velocity specified by either GOFR or ER is higher than the physical velocity, and *vice versa*. These velocity adjustments are shown to result from simultaneous adaptations of both step length and step duration. The role of visual information in the control of self-motion velocity is discussed in relation with other factors.

⁷ Francois, M., Morice, A. H., Bootsma, R.J., & Montagne, G. The visual control of locomotion. *Neurosci Res*, (under review).

INTRODUCTION

How do we control our walking speed? Over the last 60 years, a large number of studies have explored the nature of the perceptual-motor dialogue involved in many locomotory activities (Warren, 1998). These studies have provided not only a description of perceptual information involved in the execution of these tasks, but also the identification of laws of control linking these sources of information to movement. Surprisingly, the issue of the control of self-motion velocity and more precisely of the role of the optical correlates of displacement velocity in the control process is still open to debate. An overview of existing findings is provided in the following sections.

Locomotion speed has been shown to be constrained by a number of factors, including anthropometrical dimensions and perceptual information. As an illustration of the role of anthropometrical dimensions, preferred stride frequency of walking—and consequently preferred walking speed—has been successfully modeled for many living agents via pendulum dynamics (Kugler & Turvey, 1987). The origin of such species-dependent behavior should be rooted in the optimization of several kinematic (e.g., angular accelerations of ankle (Hreljac, 1995) and biomechanical factors (e.g., prevention of stress in the dorsiflexor muscles of ankle (Hreljac, 1995)). However, in addition to the influence of such permanent constraints⁸ on locomotion behavior, perceptual information has been demonstrated to contribute continuously (i.e., at a short time scale) to the adaptive control of locomotion. For instance, limb proprioception has been experimentally demonstrated to influence the control of locomotor velocity. Indeed, during a blindfolded forward walk at constant velocity, participants respond to hamstrings vibration, giving rise to an illusory backward displacement of the centre of mass, by an increase in velocity (Ivanenko, Grasso, & Lacquaniti, 2000). Visual information has also been shown to play a major role in the control process (Warren, 1998). In the majority of the recent studies on this topic, the ingenious methodological feats of earlier studies (Rieser et al., 1995) have been replaced by virtual reality technology (e.g., Konczak, 1994; Mohler, Thompson, Creem-Regehr, Pick, & Warren, 2007; Pailhous, Ferrandez, Fluckiger, & Baumberger, 1990; Prokop, Schubert, & Berger, 1997) that provides a powerful tool to examine the underlying perceptual-motor dialogue. Pailhous et al. (1990) asked their participants to maintain a constant walking velocity in different visual flow

⁸ Permanent constraints should here be understood as constraints that evolve slowly (along the long time scale of life-long development) for a given agent.

conditions. During the experiment the gain between the actual walking speed and its visual consequences was manipulated. Participants were found to decrease their walking velocity when the gain was larger than one, whereas no changes occurred when the gain was smaller than one. Comparable results have been reported in different experimental setups, including projection on a half-spherical screen (Prokop et al., 1997) and walking through a virtual hallway (Konczak, 1994) or walking on a self-driven treadmill (Mohler et al., 2007).

Visual information has also been reported to influence the walk-to-run and run-to-walk transitions (Mohler et al., 2007). Participants were asked to advance on a treadmill while velocity was gradually increased or decreased. Once again the gain between the participants' locomotor speed and its visual consequences was manipulated (using gains of 2 or 0.5 relative to the control gain of 1). Walk-to-run transitions occurred at a lower velocity (2.04 m/s) in the condition with a gain of 2 than in the control condition (2.11 m/s), whereas the inverse pattern was obtained in the condition with a gain of 0.5 (2.18 m/s). Similar results were obtained for the run-to-walk transitions.

This short overview of the literature clearly indicates that walking speed is influenced not only by anthropometrical dimensions but also by different types of perceptual information. The present study aimed at providing a more detailed understanding of the characteristics of optic flow information involved in the regulation of walking velocity. Indeed, even if the studies discussed above unambiguously demonstrate the functional role played by optic flow in the control of displacement velocity, they have not allowed the identification of the pertinent properties of the optic flow involved. Put differently, more fine-grained manipulations of the optic flow—going beyond a mere change in gain—should allow pinpointing the optical flow characteristics involved in the control of displacement velocity.

Larish et Flach (1990) demonstrated that self-motion velocity was specified by (at least) two properties of the optic flow namely Global Optic Flow Rate (GOFR) and Edge Rate (ER). GOFR, firstly expressed by Warren (1982), corresponds to the (average) angular velocity of texture elements in the environment. GOFR is inversely proportional to eye height and independent of texture density. ER corresponds to the number of texture elements that pass by the observation point in a given visual direction. ER is independent of eye height and dependent on texture density. In Larish et Flach's experiments (1990), participants were asked to perform magnitude judgements of self-motion velocity in a simulated environment while ER and GOFR were manipulated. The results demonstrated that ER and GOFR have additive effects on magnitude judgments of self-motion velocity. Increasing ER, GOFR, or both resulted in increasing speed estimates. Moreover the authors showed that ER dominated

GOFR in judging speed. This study therefore suggests that these two properties of optic flow are indeed used by participants to judge their displacement velocity, at least when exposed to an optic flow simulating self-motion (i.e., passive stimulation).

Are these two properties of the optic flow also used by participants to control their velocity while performing a perceptual-motor task? Fajen (2005b) reported a series of experiments exploring the visual control strategies underlying emergency braking. In these experiments GOFR was manipulated by changing eye height and ER was manipulated by changing the density of ground-texture elements, achieved by changing the size of bricks constituting the ground-texture. Fajen's (2005b) results revealed that when eye height was increased (i.e., GOFR decreased) and/or texture density decreased (ER decreased), braking was initiated later in comparison with the control condition and, as a consequence, participants tended to crash into the target. Conversely, braking was triggered earlier and participants undershot the target in the opposite conditions.

Thus, both GOFR and ER appear to be used in judging self-motion speed as well as in triggering emergency braking, even though the contribution of each source of information might depend on the task at hand. In the current study we examined the role of these two sources of information in the control of walking speed. More precisely, we sought to determine the respective roles of GOFR and ER in a task requiring the participants to walk at preferred speed, by biasing these two properties. We hypothesized that participants should decrease their walking velocity in the case the displacement velocity specified by either GOFR or ER was higher than the actual displacement velocity and vice versa.

METHOD

Materials and methods

Eight participants (22.4 ± 1.4 years old) with normal or corrected to normal vision volunteered for participation in the present study. A local ethics committee approved the experimental protocol. The virtual reality set-up (Figure 37A) consisted of two host computers, a treadmill (Medical Development), a Barco video-Projector (BARCO IQ R500), and a 2.3 m high $\times$ 3.0 m wide projection screen. The participants walked on the treadmill, equipped with a 0.49 m wide $\times$ 1.82 m long moving belt sliding over a flat and rigid surface,

and wore headphones in order to avoid the potential use of auditory information on walking speed emanating from the treadmill. Participants were attached to the back of the treadmill by means of a weight-lifting belt and a rigid rod allowing small vertical and sideward movements when walking. This set-up allowed participants to exert horizontal forces on the treadmill belt so as to regulate walking speed. The velocity of the treadmill belt was sampled *via* an optical encoder (200 Hz) and sent by a RS-232 serial port to the first host computer that monitored the walking velocity and computed the position of participants in the virtual scene on-line. Virtual positions were sent by a RS-232 serial port to the second host computer in charge of generating the corresponding visual scene. Images were back-projected by the videoprojector (refresh rate 60 Hz) onto the screen, placed 0.70 m in front of the participants (providing a $117^\circ \times 130^\circ$ field of view). The scene consisted of a textured ground plane made up of black and white squares (1.15 m wide $\times$ 1.15 m height) and a 0.1 m wide red displacement axis. The end-to-end latency of the virtual set-up was estimated to be at maximum equal to 30 ms.

Before beginning the experiment proper, participants were asked to walk at least 5 minutes on the treadmill in order to familiarize themselves with the apparatus. Participants were then asked to walk as naturally as possible at preferred speed during 3 minutes in order to record their preferred walking velocity.

The experiment consisted of two successive walking phases (denoted *preparation* and *test*) separated by a 30 s rest period during which participants stood upright in the dark. In the *preparation* phase, participants were asked to walk at an imposed velocity corresponding to either 80% 100% or 120% of their preferred velocity during 2 minutes. A visual feedback was provided when they deviated from the required velocity more than a criterion of 2.5 times the recorded standard deviation of their preferred velocity. The visual scene was tinted either red or green when walking velocity was too high or too low, respectively. The aim of the *preparation* phase was essentially methodological. Several blind-walking experiments, have revealed that participants could use non-visual sensory signals either to walk accurately towards a previously seen target or to produce a previously learned displacement velocity (Thomson, 1983). By imposing several walking velocities during the preparation phase to the participant, we wanted to make the non-visual (e.g., proprioceptive) calibration of the preferred walking velocity more difficult and we expected the participants to rely more heavily on the visual information available during the completion of the task, when they were asked to produce their preferred walking velocity during the test phase.

During the following *test* phase, participants were instructed to reproduce their preferred walking velocity during 2 minutes. In this phase we either manipulated the participant's eye

height (2 modalities) or the texture density of the floor (2 modalities). Eye height was either divided by two (expected to give rise to an overestimation of self-motion velocity, $EH \times 0.5$ condition) or multiplied by two (expected to give rise to an underestimation of self-motion velocity, $EH \times 2$ condition). Along the same logic, texture density was either divided by two (expected to give rise to an underestimation of self-motion velocity, $Density \times 0.5$ condition), or multiplied by two (expected to give rise to an overestimation of self-motion velocity, $Density \times 2$ condition). In the *Control* condition the eye height corresponded to the participants' eye height and an intermediate texture density (0.75 rectangles/m²) was provided to the participant leading potentially to a perfect estimation of self-motion velocity.

These manipulations gave rise to five Environment conditions ($EH \times 0.5$, $EH \times 2$, $Density \times 0.5$, $Density \times 2$ and *Control*). The 15 experimental conditions (3 Preparations⁹ $\times$ 5 Environments) were repeated 3 times each, giving rise to a total of 45 trials per participant. The order of presentation of the trials was randomized. In each walking phase (*Preparation* and *Test*), participants were required to count various rectangular objects appearing randomly either on the right hand side or on the left hand side of the visual scene. Again the aim of the procedure was to prevent the participant from using a cognitive strategy to control their displacement pace (e.g., counting the step number for a given distance), but rather to rely extensively on the perceptual (visual) information available. The velocity, size and time of appearance and the number of these elements to be counted were randomized across trials.

Analysis focused on four dependent variables: variability of walking velocity, average walking velocity, step length and step duration. For each participant in each condition, these variables were computed for 10 consecutive blocks of 10 s duration, excluding the first and last 10 s of the 2 min test trials. Data were analyzed using ANOVAs with repeated measures on the factors Preparation (3 levels: 80%, 100%, 120% of preferred velocity), Environment (5 levels: $EH \times 0.5$, $EH \times 2$, $Density \times 0.5$, $Density \times 2$ and *Control*) and Block (10 levels) factors. Significant ($P < 0.05$) main effects and interactions were examined using Newman-Keuls post-hoc tests.

⁹ Remember that the function of the preparation phase was essentially methodological. Its inclusion in the analysis of variance was designed to ensure that this phase did not influence the capacity of the participants to produce their preferred velocity during the following test phase.

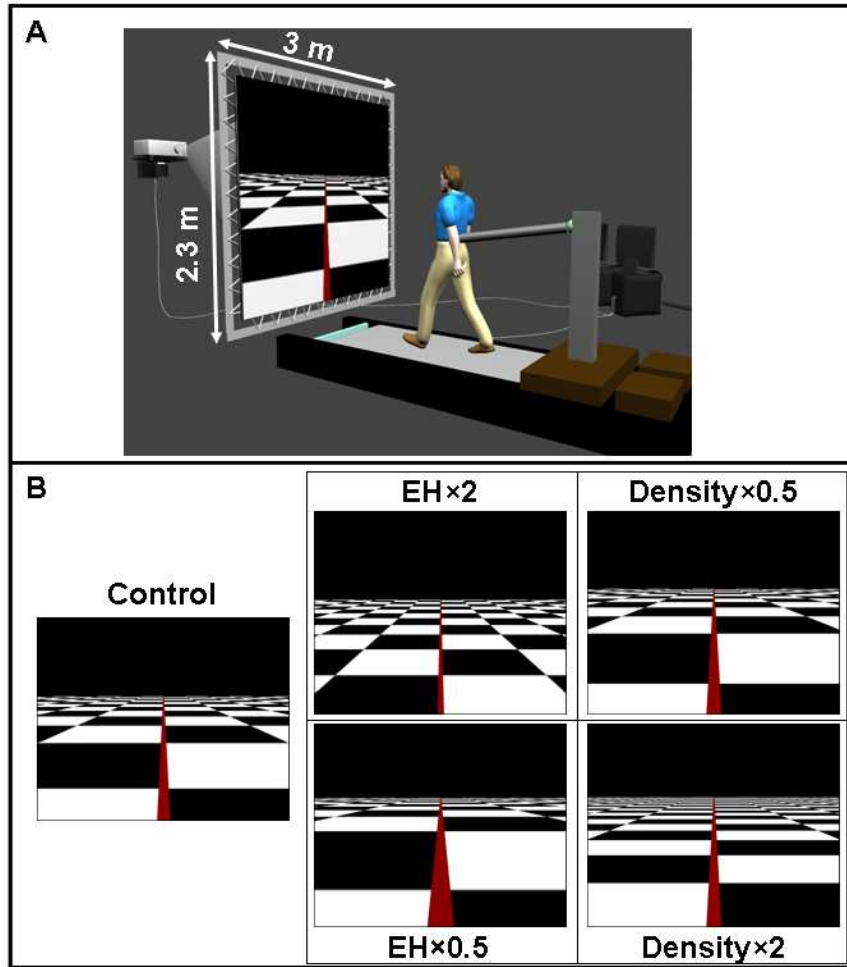


Figure 37 : (A) Experimental setup and (B) screenshots of the different experimental manipulations in the virtual environment of Global Optic Flow Rate and Edge Rate conditions as compared to the *Control* condition. Increasing eye height ($EH \times 2$) or decreasing texture density ($Density \times 0.5$) was expected to lead to a decrease in perceived displacement velocity. Decreasing eye height ($EH \times 0.5$) or increasing texture density ($Density \times 2$) was expected to lead to a increase in perceived displacement velocity.

RESULTS

The ANOVA on the variability of walking velocity did not reveal any significant main effects (all P 's > 0.05) of the factors Preparation, Environment or Block, indicating that the stability of walking behavior did not vary systematically across experimental conditions nor over the duration of a trial.

The ANOVA on walking velocity revealed a significant main effect of Environment ($F_{(4,28)} = 89.69$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.93$) but no main effects of Preparation ($F_{(2,14)} = 0.05$, $P > 0.05$, $\eta_p^2 = 0.01$) and Block ($F_{(9,63)} = 1.69$, $P > 0.05$, $\eta_p^2 = 0.19$). The only significant interaction to appear was between Preparation and Environment ($F_{(8,56)} = 2.55$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.27$). This interaction indicated that walking velocity during the $Density \times 2$ condition was

slightly higher following 120% Preparation than for the two other Preparation conditions (Figure 38). Moreover, contrary to the other Preparation conditions, under the 120% Preparation condition, the velocity in the *Density*×0.5 condition did not significantly increase relative to the *Control* condition. However, given that the effect size of the Environment × Preparation interaction was small ($\eta^2_p = 0.27$) and that it concerned only minor aspects (as revealed by Figure 38), we focussed on the main effect of Environment ($\eta^2_p = 0.93$). Post-hoc tests indicated that, in comparison to the *Control* condition (mean walking velocity 1.14 m/s), walking velocity significantly ($P < 0.05$) increased in both *EH*×2 and *Density*×0.5 conditions. Conversely, walking velocity significantly ($P < 0.05$) decreased in both *EH*×0.5 and *Density*×2 conditions. Moreover, GOFr affected walking velocity more than ER: walking velocity was higher in the *EH*×2 than in the *Density*×0.5 condition (1.31 m/s vs. 1.20 m/s, respectively, $P < 0.05$) and lower in *EH*×0.5 than in *Density*×2 (0.94 m/s vs. 0.98 m/s, respectively, $P < 0.05$).

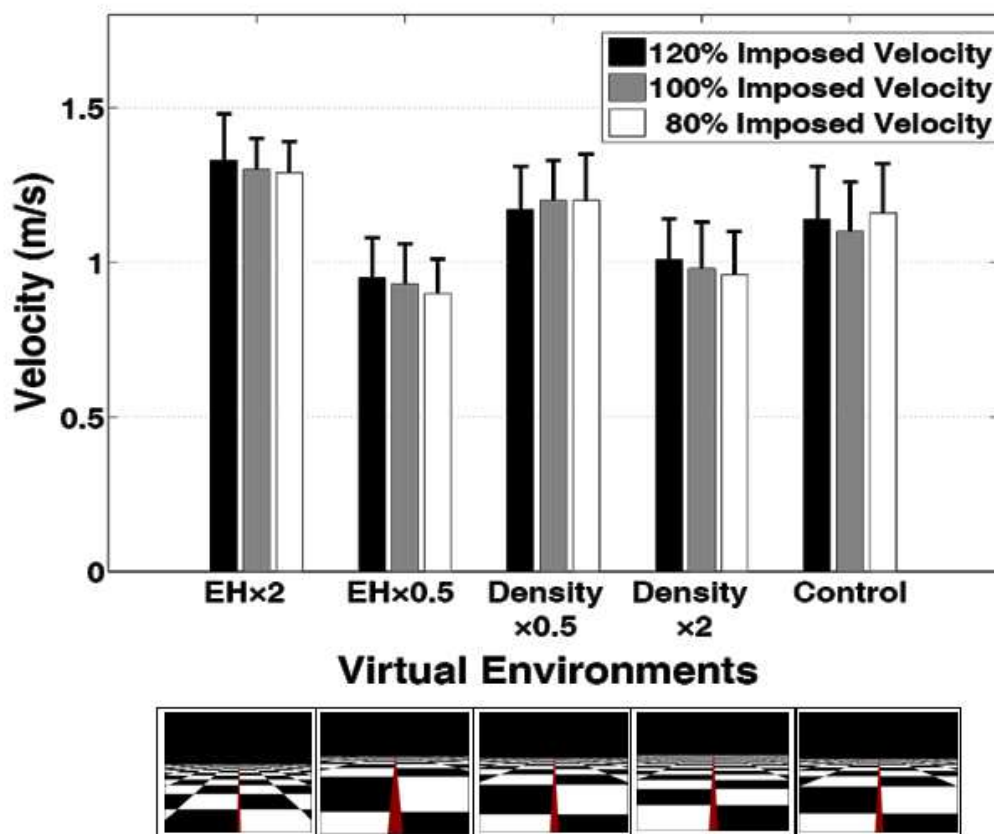


Figure 38 : Average walking velocity during the test phase following three different preparation conditions (imposed velocity equal to 80, 100 and 120% of preferred walking velocity) in the five visual environments (*EH*×2, *EH*×0.5, *Density*×0.5, *Density*×2 and *Control* conditions). Participants' walking velocity was higher in *EH*×2 and *Density*×0.5 conditions than in the *Control* condition. Participants' walking velocity was lower in *EH*×2 and *Density*×2 conditions than in the *Control* condition. The error bars represent between-participant standard deviations.

In sum, the observed modifications in walking velocity are consistent with our predictions. The conditions in which the use of either GOFR or ER leads to an underestimation of displacement velocity (*EH*×2 and *Density*×0.5) gave rise to an increase in displacement velocity, in comparison with the *Control* condition while the opposite (*EH*×0.5 and *Density*×2) gave rise to a decrease in displacement velocity. Experimental changes in GOFR, via manipulation of eye height, gave rise to larger changes in walking velocity (*EH*×0.5: 16.9%, *EH*×2 15.0%) than experimental changes in ER, via manipulation of texture density (*Density*×0.5: 5.3%, *Density*×2: 13.0%).

The ANOVAs on step length and step duration revealed significant main effects of both Preparation ($F_{(2,14)} = 5.85$, $P < 0.05$, $\eta^2_p = 0.45$ and $F_{(2,14)} = 5.92$, $P < 0.05$, $\eta^2_p = 0.46$, respectively) and Environment ($F_{(4,28)} = 186.58$, $P < 0.05$, $\eta^2_p = 0.97$ and $F_{(4,28)} = 178.38$, $P < 0.05$, $\eta^2_p = 0.96$, respectively), but no significant main effect of Block ($F_{(9,63)} = 1.96$, $P > 0.05$, $\eta^2_p = 0.21$ and $F_{(9,63)} = 0.94$, $P > 0.05$, $\eta^2_p = 0.12$, respectively). Step duration was also characterized by a significant Preparation × Environment interaction ($F_{(8,56)} = 5.24$, $P < 0.05$, $\eta^2_p = 0.43$). While this interaction revealed the same effects (see Figure 39) as described for walking velocity, we again concentrated on the main effects of the experimental factors.

Post-hoc tests indicated that the main effects of Preparation resulted from a small but systematic increase in step length and step duration in the 120% condition in comparison with the 80% condition (0.61 vs. 0.59 m for step length; 0.67 vs. 0.65 s for step duration, P s < 0.05).

Step length and step duration varied systematically as a function of the visual Environment. Post-hoc analysis revealed that step length (▲ symbols in Figure 39) increased in both the *EH*×2 and *Density*×0.5 conditions in comparison with the *Control* condition (0.69 and 0.66 vs. 0.62 m, respectively, P s < 0.05) (left sides of Figure 39) and significantly decreased in both the *EH*×0.5 and *Density*×2 conditions (0.51 and 0.51 m vs. 0.62 m, P s < 0.05) (right sides of Figure 39). Similarly, a post-hoc analysis on the effect of Environment on step durations (● symbols in Figure 39) revealed a decrease in step duration in both *EH*×2 and *Density*×0.5 conditions in comparison with the *Control* condition (0.56 and 0.61 s vs. 0.65 s, respectively, $P < 0.05$) and an increase in step duration in both *EH*×0.5 and *Density*×2 conditions (0.76 s and 0.72 s vs. 0.65 s, respectively, $P < 0.05$). Moreover, both step length and step duration were significantly more affected by GOFR than by ER. Indeed, step length was found to be significantly longer and step duration significantly shorter for the *EH*×2 than for the *Density*×0.5 condition (0.69 vs. 0.66 m and 0.56 vs. 0.61 s; P s < 0.05).

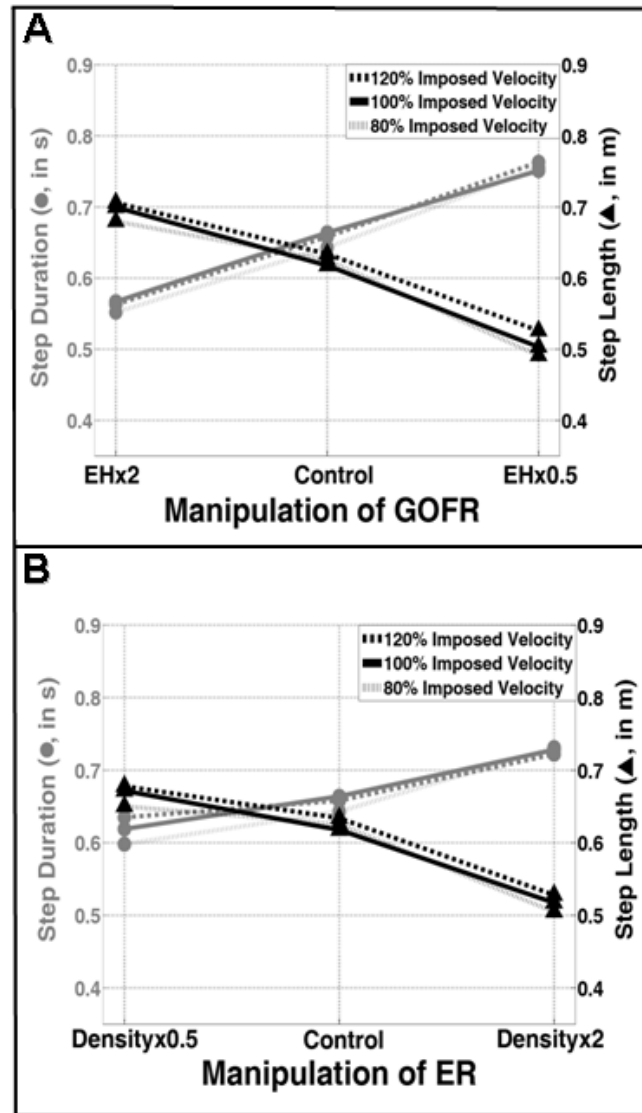


Figure 39 : Average step length (▲) and step duration (●) during the test phase following three different preparation conditions (dashed, solid and dotted lines) plotted as a function of (A) GOFR manipulated via eye height and (B) ER manipulated via texture density. For both types of manipulation (GOFR or ER), step length and step duration are inversely influenced. Participants decreased their step length and increased their step duration when the manipulations lead them to overestimate their displacement velocity ($EH \times 0.5$ and $Density \times 2$). Conversely, participants increased their step length and decreased their step duration when the manipulations lead them to underestimate their displacement velocity ($EH \times 2$ and $Density \times 0.5$).

DISCUSSION

How do we control our walking speed? In this study we sought to provide an answer to this question by asking participants to maintain their preferred velocity in different visual environments. More precisely, we tested the role of two optical correlates of self-motion speed, namely Global Optic Flow Rate (GOFR) and Edge Rate (ER). GOFR and ER were biased by manipulating eye height and ground texture density, respectively. If these sources of information were used to control self-motion speed, such manipulations should affect walking velocity. More precisely a decrease in participants' walking velocity was expected in both $EH \times 0.5$ and $Density \times 2$ conditions (i.e., when displacement velocity was overestimated by these sources). On the other hand, an increase in participants' walking velocity was expected in both $EH \times 2$ and $Density \times 0.5$ conditions (i.e., when displacement velocity was underestimated by these sources). Our results are in line with these predictions, thereby confirming the hypothesized active role played by both GOFR and ER in the visual control of displacement velocity. While previous studies already demonstrated the role of visual information in the control of self-motion velocity (Konczak, 1994; Mohler et al., 2007; Pailhous et al., 1990; Prokop et al., 1997), our study allows a precise identification of the optical correlates (GOFR and ER) involved in this control. Our results complement the results obtained by Larish et Flach (1990) by showing that the role of both GOFR and ER is not restricted to the perception of self-motion velocity; they also play an active role in the control of self-motion velocity. Furthermore, while these two sources of information have already been shown to be involved in the control of emergency braking (Fajen, 2005b) or the perception and the control of accelerating egospeed (Cox & Dyre, 1999), (Cox & Dyre, 1999) the present study provides the first demonstration of their use in a perceptual-motor task requiring the participants to control their displacement velocity as a primary goal.

This experiment also allowed us to describe the kind of behavioral adaptations underlying the observed modifications of walking velocity. Indeed, changes in walking velocity can arise from modifications of step amplitude (i.e., step length), step frequency (i.e., step duration), or a combination of both. Results showed that displacement velocity changes produced by the participants were based on a combination of step length and step duration adaptations. Participants increased their displacement velocity by increasing step length and decreasing step duration. Conversely, participants decreased their displacement velocity by decreasing step length and increasing step duration. These results confirm those obtained in

similar tasks, which showed that an overestimation of displacement velocity gives rise to decrease in displacement velocity through a decrease of stride length (Pailhous et al., 1990).

Our results also show that the magnitude of the walking velocity adaptations induced by biasing optical correlates depends on the direction of the bias. Walking velocity adaptations are more pronounced when displacement velocity is overestimated (-16.9% in *EH*×0.5 and -13% in *Density*×2), than when displacement velocity is underestimated (+15% in *EH*×2 and +5.3% in *Density*×0.5). This result is in agreement with studies that manipulated the gain between walking speed and its visual consequences (Baumberger, Flückiger, & Roland, 2000; Konczak, 1994). When the gain is manipulated, more pronounced walking velocity adaptations have been reported when the optic flow leads to an overestimation rather than an underestimation of the displacement velocity (i.e., when the gain is higher rather than lower than 1). Interestingly the results related to step length adaptations mirrored the results for step duration. Indeed, step length adaptations were larger in the two conditions of overestimation of displacement velocity, giving rise to a decrease in walking velocity (-19% in *EH*×0.5 and -17% in *Density*×2 relative to the *Control* condition) than in the two conditions of underestimation of displacement velocity, giving rise to an increase in walking velocity (+10% in *EH*×2 and +6.5% in *Density*×0.5 relative to the *Control* condition).

Our study also provides insight into the relative contribution of the two optical correlates of self-motion tested in this experiment. Indeed, larger modifications of walking velocity were observed when eye height was manipulated (thereby biasing GOFr) than when the texture density was manipulated (thereby biasing ER). This result is in agreement with the previously reported dominance of GOFr over ER observed in emergency braking tasks (Fajen, 2005b). Interestingly our study revealed that this dominance gave rise to larger adaptations in both step length and step duration (on average, 8.4% in *EH*×2 and 11.5% in *EH*×0.5 vs. 4.1% in *Density*×0.5 and 9.6% in *Density*×2).

CONCLUSION

In conclusion, this experiment enhanced our understanding of the role played by the optical correlates of self-motion GOFr and ER in the control of walking velocity in addition to several factors including anthropometrical dimensions (Kugler & Turvey, 1987), energy expenditure (Holt, Hamill, & Andres, 1991) and biomechanical constraints (Hreljac, 1995) and shows that participants can modify their preferred velocity up to 16 % to satisfy optical constraints.

CHAPITRE 2 : L'interception et ses lois de contrôle

2. Quelles informations pour réguler les déplacements ?

2.2. Complémentarité des lois de contrôle

The complementary use of laws of control¹⁰

ABSTRACT

The aim of this study was concerned with the process by which participants select laws of control in interceptive task while we biased the self-motion velocity. We used a virtual environment coupled with a treadmill to test two perceptual strategies involved in interceptive action: the Constant Bearing Angle (CBA) and the Modified Required Velocity (MRV). We manipulated the curvature of the ball's trajectories and the display of these trajectories. Participants were asked, if necessary, to modify their walking velocity in order to intercept a ball while we biased the self-motion velocity by manipulating the Global Optical Flow Rate (GOFR). Results showed a large effect of the curvature on walking velocity when the trajectory was not displayed, which was a signature of use of the CBA strategy. On the contrary, the walking velocity produced was less affected by displaying the trajectory, which suggested the use of the MRV strategy. Results also showed that biasing the self-motion velocity entailed longer velocity regulations when the MRV strategy was used than when participants used the CBA strategy. However, contrary to the predictions of the MRV model, the effect of the manipulation of GOFR lasted until the middle of the trial and the subjects were able to perform the interception. This suggests that subjects used the MRV model until they realized the failure was imminent and they switched to the CBA model.

¹⁰ François, M., Morice, A.H.P., Bootsma, R.J., Montagne, G. The complementary use of laws of control (*submitted*)

INTRODUCTION

The perceptual control of goal-directed behavior has been addressed in a large set of studies over the last decade. These studies have not only allowed for a better understanding of the perceptual-motor dialogue underlying the control of the action. They have also given rise to the formalization of laws of control proposing unequivocal (and hence testable) accounts of the mutual dependency between motor and perceptual components in different tasks. Conceptually, these laws of control are taken to reflect the operation of organizational (perceptual-motor) principles and theoretically allow several categories of agents to perform a given task under a wide variety of experimental conditions. Morice, Francois, Jacobs et Montagne, (2010) recently questioned the presumed robustness of one such a law of control (known as the Constant Bearing Angle strategy) in the domain of interceptive tasks performed by humans. According to this law of control (Equation 1) (Figure 40A), the strategy of maintaining constant the angle subtended by the current position of the target and the direction of displacement of the observer gives rise to interception of the ball:

$$\ddot{Y} = k_1 \times \frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}} \times \dot{\theta} + k_2 \times \dot{Y} \quad (\text{Equation 1})$$

In this equation, $\dot{Y}$ is the walking speed (in m/s), $\ddot{Y}$ is the acceleration (in m/s²), $\dot{\theta}$ is the rate of change of the bearing angle (in deg/s, with $\dot{\theta} > 0$ indicating an increase in θ), k_1 is a parameter that modulates the strength of the coupling between $\ddot{Y}$ and $\dot{\theta}$, and k_2 is a parameter that modulates the strength of the damping term. The function $\frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}}$ is an activation function. The damping term with its activation function acts so as to mimic the gradual character of changes in velocity stemming from neurophysiological delays and biomechanical inertia that lead agent to zero out changes in bearing angle in a stable manner.

This law of control has been demonstrated to account for the observed adjustments in walking speed in order to intercept laterally approaching targets under a variety of different task and environment constraints, varying either within or between trials (e.g., Bastin, Calvin, & Montagne, 2006a; Bastin, Craig, & Montagne, 2006b; Bastin, Jacobs, Morice, Craig, & Montagne, 2008; Bastin & Montagne, 2005; Chardenon, Montagne, Buekers, & Laurent, 2002; Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2004; Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2005; Lenoir, Musch, Janssens, Thiery, & Uyttenhove, 1999a; Lenoir, Savelsbergh,

Musch, Thiery, Uyttenhove, & Janssens., 1999b; Lenoir, Musch, Thiery, & Savelsbergh, 2002).

In a recent contribution however, Morice et al. (2010) provided evidence that participants did not always rely on the CBA strategy. In their study they evaluated the effects of presenting the future spatial path of the ball for different types of ball trajectory (rectilinear or curvilinear). Interestingly, according to the CBA strategy manipulating the curvature of the ball path should influence displacement velocity adjustments in a specific way (cf., Predictions section of Chapter 1, section 3.3.3.2.4). Presenting the future ball path, on the other hand, should not affect the regulation behavior of the participants as this manipulation does not affect the time course of the rate of change in bearing angle. The results speak in favor of the operation of the CBA strategy when the ball path is not depicted, as manipulating the curvature of the ball's trajectory was found to influence displacement velocity adjustments in the way predicted by the CBA strategy. In contrast, when the ball path was depicted the walking kinematics were less affected by the curvature manipulations. Moreover, under those conditions a modified Required Velocity (MRV) strategy (Equation 2 and 3)(Figure 40B) provided a better explanation of the regulation behavior produced by the participants than the CBA strategy:

$$\ddot{Y} = k_1 \times (k_2 \times \dot{Y}_{req} - \dot{Y}) \quad (\text{Equation 2})$$

with

$$\dot{Y}_{req} = (Y_{ip} - Y)/TTC \quad (\text{Equation 3})$$

where Y , $\dot{Y}$, and, $\ddot{Y}$ are the participants' actual position, speed, and acceleration, Y_{req} is the required walking speed, Y_{ip} is the future interception position, TTC is the time remaining before the ball reaches Y_{ip} , and k_1 and k_2 are constants.

The study by Morice et al. (2010) thus allowed circumscribing the field in which the CBA strategy operates, through the identification of boundary conditions; it also provided results compatible with an information-driven switch between two laws of control. Because the MRV strategy (but not the CBA strategy) takes into account the participant's walking speed, a more direct test of the operation of the MRV strategy in informationally-enriched environments can be obtained by manipulating the optical correlates of either participants' current or required speed. The aim of the present study is precisely to question the operation

of the MRV strategy, particularly in informationally-enriched environments, through the manipulation of one of the optical correlates of current displacement velocity.

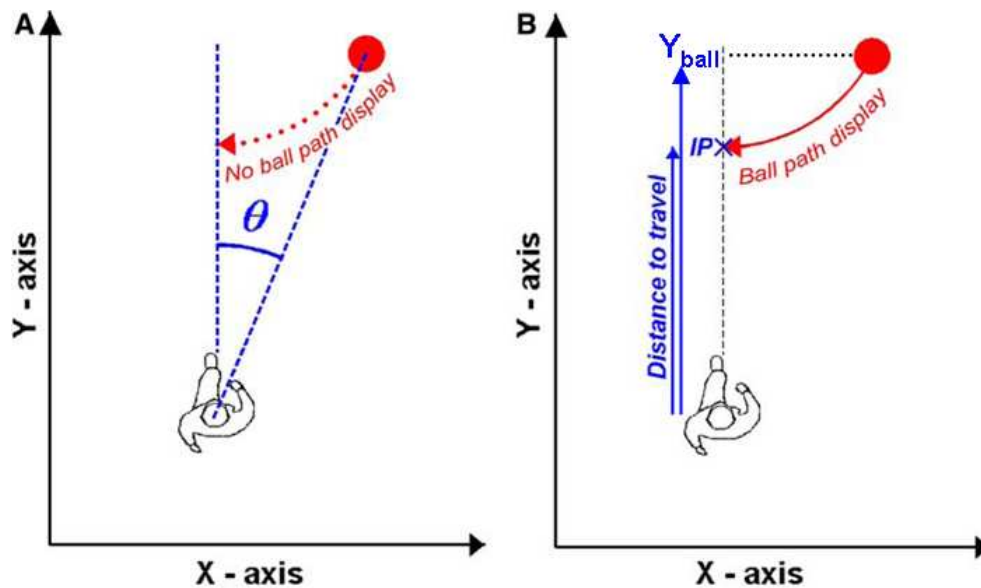


Figure 40 : Schematic sketches of the experimental layout. Participants walked on a rectilinear path and aimed to intercept balls that travelled toward their displacement axis. (A) The natural informative content of the agent-ball environment includes the bearing angle (θ), which forms the informative support of the CBA strategy. The CBA strategy holds that the agent's velocity is regulated so as to cancel change in θ . (B) When the ball track is displayed on the screen, the informative content of the visual scene is enriched according to natural conditions. The distance to the interception point (IP) is part of the informative support of the MRV strategy.

It is now well established that two optical correlates of displacement velocity, Global Optic Flow Rate (GOFR) and Edge rate (ER), are used by participants to judge their displacement velocity (e.g., Larish & Flach, 1990; Warren, 1982) and to control their velocity while performing a perceptual-motor task (e.g., Fajen, 2005b ; François, Morice, Bootsma & Montagne, *under review*). GOFR corresponds to the (average) angular velocity of texture elements in the environment. GOFR is inversely proportional to eye height and independent of texture density. ER corresponds to the number of texture elements that pass by the observation point in a given visual direction. ER is independent of eye height and dependent on texture density. In a recent study, François et al. (*under review*) (cf., Chapter 2, section 2.2) showed that both GOFR and ER are indeed used by the participants to control walking speed but also that biasing GOFR induced larger modifications of walking velocity than biasing ER. On the basis of this latter result, we decided in the present experiment to bias GOFR while participants attempted to intercept a moving ball in either normal or informationally enriched environments. If the MRV strategy is indeed used in the enriched environment, biasing GOFR

(i.e., an optical correlate of displacement speed, cf Equation 2) should affect displacement velocity adjustments. Conversely, the same manipulation should not affect the regulation behavior of participants in the normal environment, as participants would rely on the CBA strategy (cf., Equation 1) that does not depend on the perception of self-motion speed.

METHOD

Participants

Eight male students (mean age 22.75 ± 2.86 years) gave their informed consent before participating in the experiment. They all had normal or corrected-to-normal vision while their experience in ball games varied. A local ethics committee approved the experimental protocol.

Apparatus

The virtual reality set-up (Figure 41A) consisted of two PC Dell workstations (Intel® Core™ 2 CPU 6400 1 Go RAM; Asus GeForce EN8400GS), a treadmill (Medical Development), a video-projector (BARCO IQ R500) and a 2.3 m high $\times$ 3.0 m wide projection screen. The participants walked on the treadmill, equipped with a 0.80 m wide $\times$ 1.96 m long moving belt that glided over a flat and rigid surface, and wore headphones in order to avoid potential use of auditory information on walking speed emanating from the treadmill. Participants were attached to the back of the treadmill by means of a weight-lifting belt and a rigid rod, which allowed small vertical and sideward movements while participants walked on the treadmill (Figure 41A). This set-up allowed participants to exert horizontal forces on the treadmill belt so as to regulate walking speed. The velocity of the treadmill belt was sampled *via* an optical encoder (200 Hz) and sent by a RS-232 serial port to the first host computer that monitored the velocity of the belt and computed the position of participants in the virtual scene on-line. Virtual positions were sent by a RS-232 serial port to the second host computer in charge of generating the corresponding visual scene. Images were back-projected (refresh rate 60 Hz) onto the screen, positioned 0.70 m in front of the participants (providing a $117^\circ \times 130^\circ$ field of view). The scene consisted of a textured ground plane made up of black and white squares (1.15 m $\times$ 1.15 m) and a 0.1 m wide red displacement axis

(Figure 41A). The end-to-end latency of the virtual set-up was estimated to be at maximum 30 ms.

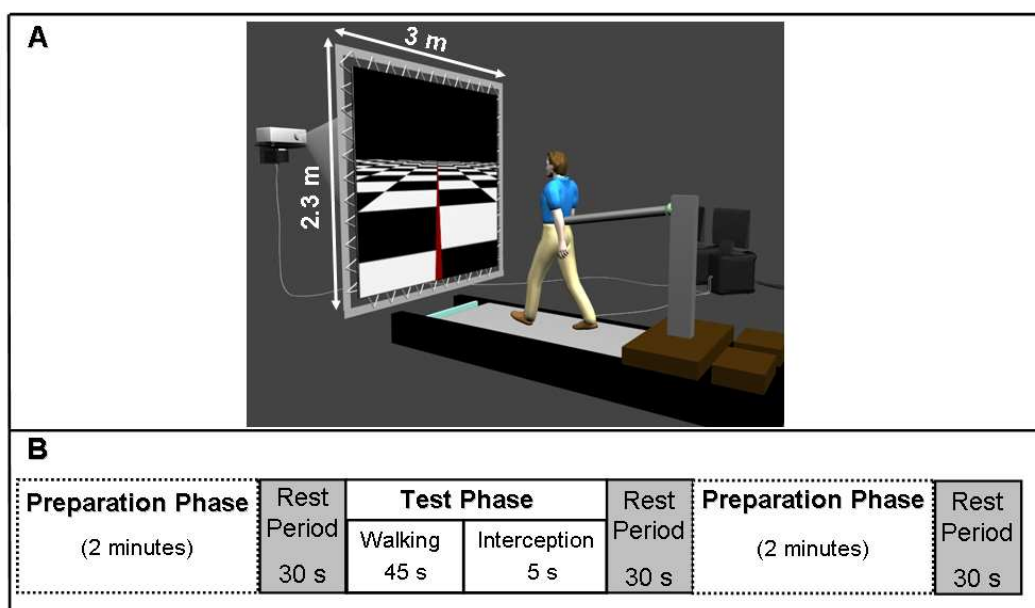


Figure 41 : (A) Overview of the virtual reality set-up and the visual scene that was projected onto the screen in front of the participants; (B) Representation of the different phases of the experiment.

Experimental Procedure

Before beginning the experiment proper, participants were asked to walk 5 minutes on the treadmill in order to familiarize themselves with the apparatus. Participants were then asked to walk as naturally as possible during 3 minutes. Their preferential walking velocity was recorded and both the mean and variability (SD) of displacement velocity computed. We used the experimental protocol developed by François et al. (*under review*) which corresponded to a preparation phase followed by a test phase, separated by a 30 s rest period during which participants stood upright in the dark (Figure 41B).

The inclusion of the preparation phase was essentially methodological. By forcing the participants to adopt several different speeds during the preparation phase, we expected them to rely on the visual information available during the test phase when they had to reproduce their preferred walking speed. During the preparation phase preceding each test phase, participants were asked to walk at an imposed velocity, corresponding to 80%, 100% or 120% of their preferred velocity, during 2 minutes (Figure 41B). To drive the participants to walk at

the imposed velocity, a visual feedback was provided by a green or red environment if participants walked, respectively, slower or faster than the prescribed velocity.

The test phase comprised two different tasks. In the first part of the test phase, participants were asked to walk at their preferred walking velocity during 45 seconds (walking task). In the second part of the test phase participants were to intercept a moving ball, appearing on the right hand side of the visual scene, by modifying, if necessary, their displacement velocity (interceptive task). At the end of each interception trial, successful interception was indicated to participants by the appearance of a green square, whereas a miss was indicated by a red square. The ball always approached while moving from right to left, and participants were forced to move forward.

Independent variables

During the test phase, we manipulated the Curvature of the ball path (two modalities), the Display Condition of the ball path (two modalities) and the Eye Height (three modalities).

The balls could approach along a rectilinear path (no curvature condition) or along a curved path (negative curvature conditions) (Figure 42B). In the curved conditions, a constant curvature of -0.2 m^{-1} was achieved by making the ball move along (a portion of) an imaginary circle with a radius of 5 m, passing through the departure and arrival points of the ball. In half of the trials, the ball-path-displayed condition, the spatial ball path was depicted in the virtual environment throughout the trial duration, as a 0.2 m wide line situated 0.4 m below the ball path (cf., Morice et al., 2010, Chapter §) (Figure 42A). In the remaining trials, the ball-path-not-displayed condition, the ball approached without its path being depicted in the virtual environment. Finally GOFR was manipulated through variations in Eye Height that corresponded either to the participants' veridical eye height (control condition)(EH) or was multiplied (EH 2) or divided (EH 0.5) by a factor 2 (Figure 40A).

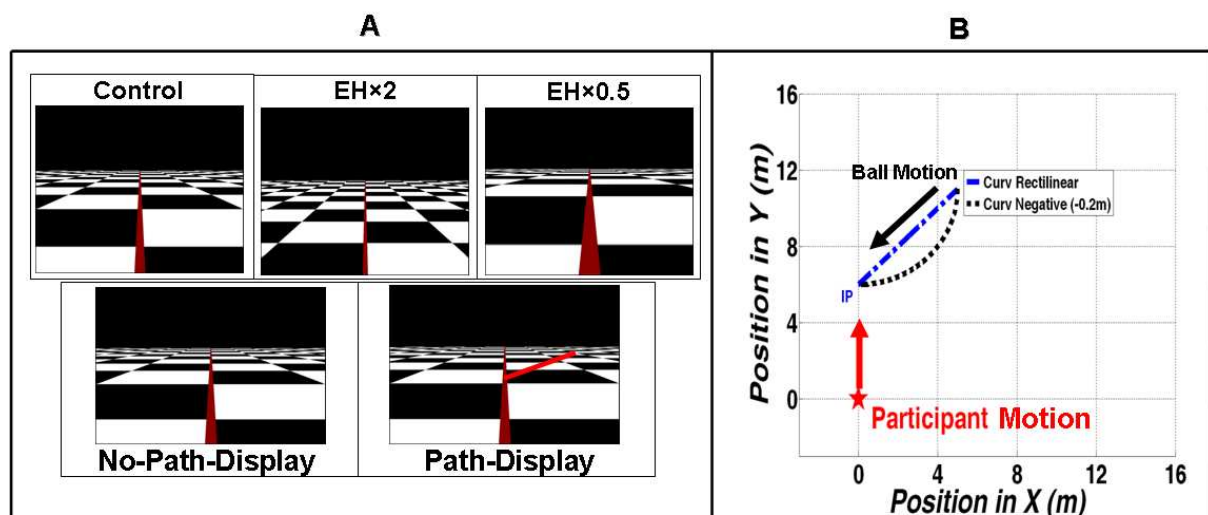


Figure 42: Experimental variables manipulated in this experiment: (A) screenshots presented to participants of the different conditions of Eye Height (upper panels) and Display Conditions (lower panels). Eye height could be veridical (control) multiplied by two (EH 2) or divided by two (EH 0.5). Moreover in half of the trials, the trajectory of the ball was displayed (Path-Display) while in the other half of the trials the ball's trajectory was not displayed (No-Path-Display). (B) The balls could approach along a rectilinear path (no curvature condition) or a curvilinear path (negative curvature conditions).

The 36 experimental conditions (3 Preparation Velocities $\times$ 3 Eye Heights $\times$ 2 Curvatures $\times$ 2 Display Conditions) were repeated 3 times each, giving rise to a total of 108 trials per participant. For each of these 108 trials, maintaining the initial velocity unchanged would have allowed the participants to intercept the ball (Offset 0). In order to prevent participants from anticipating the future arrival point of the ball, we randomly interspaced the experimental trials with 24 catch trials with ball offsets corresponding to +2 m or -2m. In the absence of changes in participant walking velocity, the balls would make contact with the head in the 0-m offset condition, pass 2 m in front of the head in the 2-m offset condition, and pass 2 m behind the head in the -2-m offset condition.

Data analysis and dependent variables

The analyses focused on the two tasks of the test phase: the walking task and the interceptive task.

Walking task

The analyses of the walking kinematics were based on the position-time series (sampled at 200 Hz) for each experimental trial of each participant. Position data were filtered using a second-order low-pass Butterworth filter with a cut off frequency of 10 Hz that was ran

through twice (in opposite directions) in order to negate the phase shift and differentiated using a three-point central difference technique. We averaged the walking velocities every 5 seconds over the last forty seconds of the trial, giving rise to 8 Time Intervals.

Interceptive task

The analyses focused both on the performance and on the walking velocity.

Performance

We used the Success Rate (SR) and the final Constant Error (CE) as descriptors of participant's performance. A trial was considered successful when the Euclidian distance between the center of participants' head and the center of the ball was equal or less than 0.30 m at the moment the ball crossed the participants' displacement axis. Constant error was calculated as the average signed distance along the participants' displacement axis between the center of the head and the center of the ball at the moment at the ball crossed the axis of displacement.

Walking velocity

Position time series were again filtered with a cut-off frequency of 10 Hz and differentiated using a three-point central difference technique. The velocity time series were averaged over intervals of 500 ms (corresponding approximately to one step; for a similar methodology, see Warren et al., 2001) giving rise to 10 Time Intervals, with data being synchronized with the moment at which the center of the ball crossed the participant's axis of displacement.

Statistics

Repeated-measures ANOVAs were used to analyze performance (SR and CE) and walking speed. Partial effect sizes were computed (η^2_p) and post-hoc comparisons were conducted using newman-keuls tests. The p value for statistical differences was set at 0.05.

Predictions

Walking task

In accordance with our previous study (François et al., *under review*), manipulating GOFR via Eye Height should give rise specific speed adjustments. More particularly, participants should decrease their walking speed in the case the displacement speed specified by GOFR (EH 0.5) is higher than the actual displacement velocity and *vice versa*.

Interceptive task

Numerical simulations allow several predictions to be made for each strategy (Figure 43). These simulations were based on the average coefficients (k_1 and k_2 , cf., Equations 1 and 2) found by Morice et al. (2010) and the bias in perceived velocity found by François et al. (*under review*). Following the results of Morice et al. (2010), the different display conditions should favor the use of a specific law of control. In the *No-Path-Display* condition the use of a CBA strategy should give rise to distinct displacement velocity profiles for the different curvature conditions. Moreover, Eye Height should influence the displacement velocity profiles moderately; more precisely manipulating eye height should influence essentially the initial conditions (i.e., the participant's velocity when the trial begins). In the *Path-Display* condition the use of a MRV strategy should lead the participants to produce the same velocity profile whatever curvature condition. Conversely, manipulating Eye Height should give rise to clearly distinguishable velocity profiles with a very slow convergence of the curves as compared to the *No-Path-Display* condition. Finally, it is worth noting that the velocity adjustments resulting from the use of a CBA strategy should lead the participant to succeed in the task under all experimental conditions, while the operation of a MRV strategy should lead the participant to fail when Eye Height is increased or decreased, relative to normal, with final errors in the order of +/- 0.8 m.

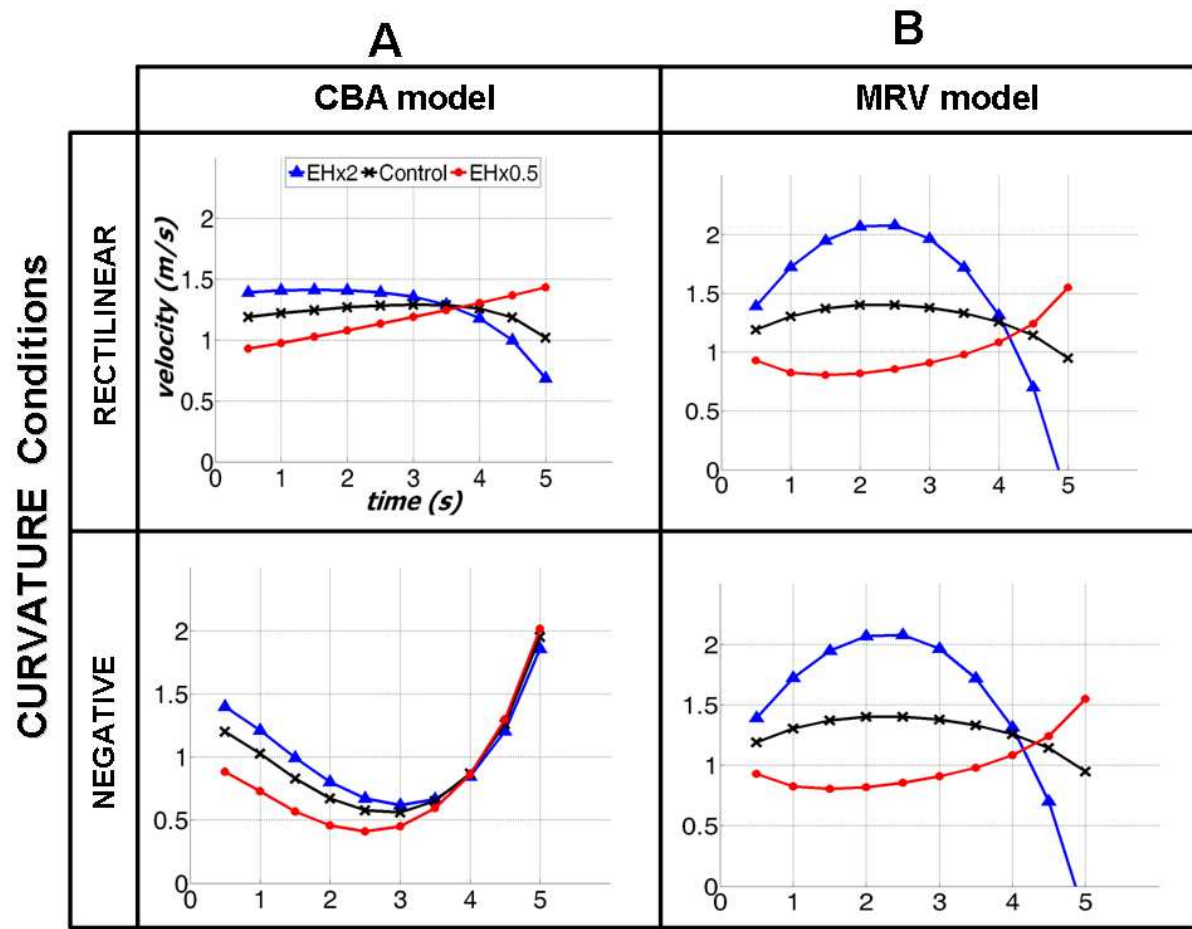


Figure 43 : Numerical simulations of the walking speed provided by the CBA (A) and the MRV (B) models, as a function of ball path Curvature and Eye Height.

RESULTS

Walking task

A three-way repeated measures ANOVA (3 Preparation Velocities $\times$ 3 Eye Heights $\times$ 8 Time Intervals) with displacement speed as dependent variable revealed significant main effects of Eye Height ($F_{(2,14)} = 109.55$, $P < 0.05$, $\eta^2_p = 0.94$) and Time Intervals ($F_{(7,49)} = 12.60$, $P < 0.05$, $\eta^2_p = 0.64$), but no significant effect of Preparation ($F_{(2,14)} = 0.30$, $P > 0.05$, $\eta^2_p = 0.04$). *A posteriori* comparisons revealed that participants increased their walking velocity (Figure 44) when Eye Height was increased (*EH 2*), in comparison with the *control* condition (*EH*) (1.30 vs. 1.19 m/s, $P < 0.05$). Conversely, participants decreased their walking velocity in comparison with the *control* condition when Eye Height was decreased (*EH 0.5*) (0.93 vs. 1.19 m/s, $P < 0.05$). These results are in agreement with those obtained by François

et al. (*under review*); decreasing Eye Height gives rise to an overestimation of walking speed and as a consequence to a slowing down of locomotion pace (and *vice versa*). Moreover, the fact that velocity of walking during the preparation phase does not affect speed adjustments during the test phase led us to remove this factor from the remaining analyses.

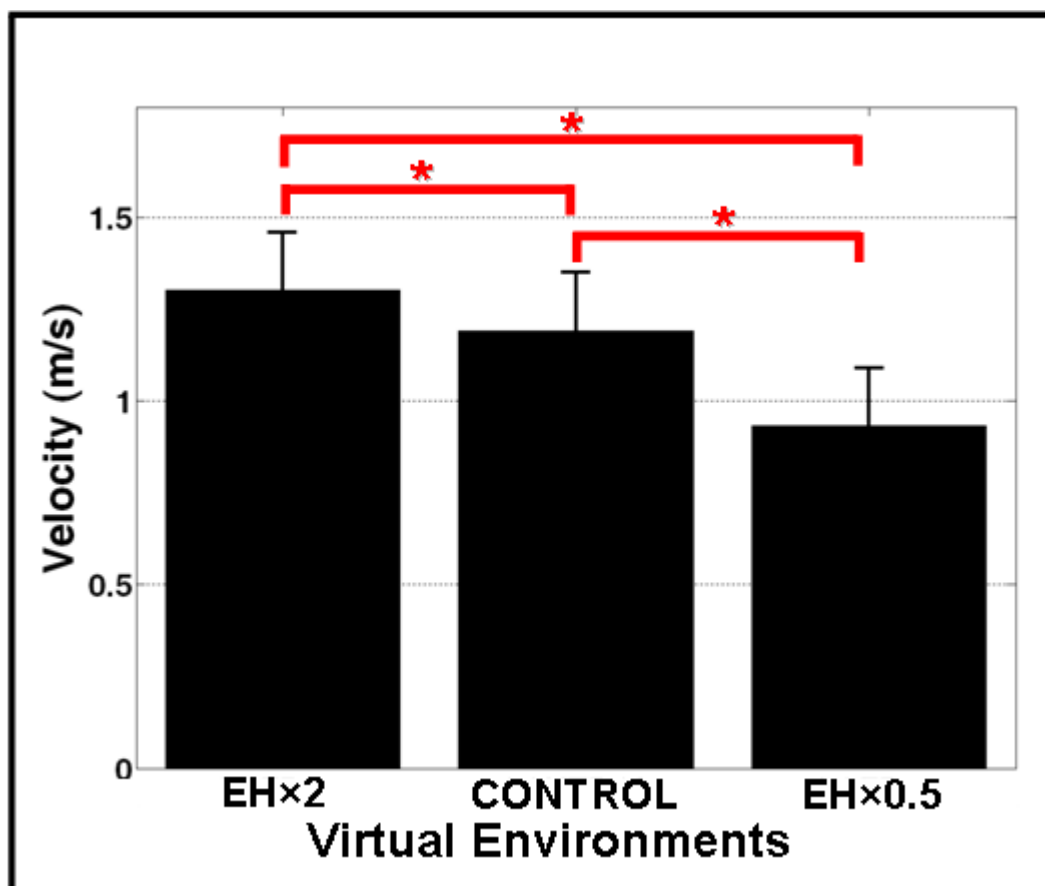


Figure 44 : Average walking velocity during the locomotion task of the test phase as a function of Eye Height conditions. Participants' walking velocity was higher in *EH 2* condition than in the *control* condition. Participants' walking velocity was lower in *EH 0.5* than in the control condition. The errors bars represent between-participant standard deviations.

Interceptive task

Performance

Three-way repeated-measures ANOVAs (3 Eye Heights $\times$ 2 Curvatures $\times$ 2 Display Conditions) with Success Rate as dependent variable revealed a main significant effect of Display factor ($F_{(1,7)} = 15.06$, $P < 0.05$, $\eta^2_p = 0.69$) (Figure 45A). A posteriori comparisons revealed that participants performed better in the *Path-Display* condition than in the *No-Path-*

Display condition (81.7 vs., 75.5 %, respectively). A three-way repeated-measures ANOVAs (3 Eye Heights $\times$ 2 Curvatures $\times$ 2 Display Conditions) with Constant Error as dependent variable revealed a main significant effect of Curvature ($F_{(1,7)} = 29.70$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.81$) (Figure 45B). *A posteriori* comparisons revealed that participants arrived slightly early at the interception point (negative errors: -0.1 m) with negative curvature and slightly late (positive error: 0.18 m) with rectilinear trajectory.

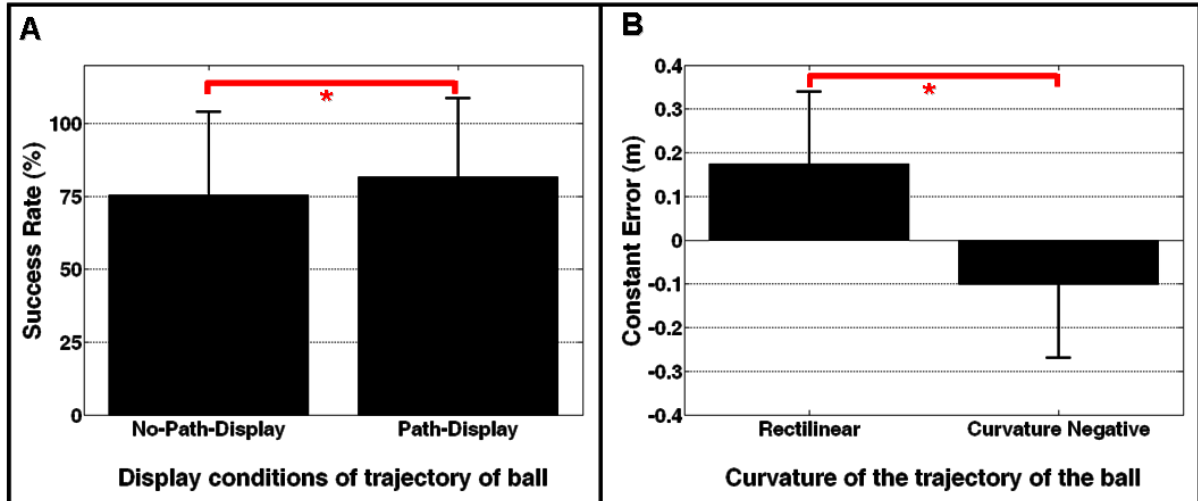


Figure 45 : Average success rate (A) and constant error (B) as a function of ball path display and ball path curvature. (A) Participants performed better in the *Path-Display* condition than in the *No-Path-Display* condition. (B) Participants reached the interception point (negative errors) with negative curvature slightly early and late (positive error) with rectilinear trajectory.

Kinematics

A four-way repeated-measures ANOVA (3 Eye Heights $\times$ 2 Curvatures $\times$ 2 Display conditions $\times$ 10 Time Intervals) with walking speed as dependent variable revealed significant main effects of Eye Height ($F_{(2,14)} = 69.67$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.91$) and Curvature ($F_{(1,7)} = 46.65$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.87$). We also found significant interactions between Eye Height and Time Intervals ($F_{(18,126)} = 27.92$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.79$), Curvature and Time Intervals ($F_{(9,63)} = 116.58$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.94$), Display and Time Intervals ($F_{(9,63)} = 22.66$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.76$), and Eye Height, Curvature, Display and Time factors ($F_{(18,126)} = 2.14$, $P < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.23$). Post-hoc analyses performed on this last interaction revealed several important effects. First of all, the time course of walking speed is affected differently by the curvature manipulations depending on the presence (or not) of ball-path display. In the *No-Path-Display* condition (left panels in Figure 46), the *negative* curvature condition gave rise to more pronounced changes in displacement speed than the rectilinear condition. More precisely, the *negative* curvature

conditions gave rise to a decrease in displacement velocity in the first part of the trial followed by a pronounced increase in displacement velocity in the second part of the trial ($P < .05$). Conversely, in the *ball-path display* condition, the reverse picture was observed. The displacement velocity changes were more pronounced in the rectilinear condition in comparison with those produced in the negative curvature condition. In this last condition, an increase in displacement velocity was observed in the first part of the trial, followed by a pronounced decrease in velocity during the second part of the trial ($P < .05$).

Finally, the marked difference in initial displacement velocity in the three Eye Height conditions whatever the experimental condition (i.e., Curvature and Display Conditions), indicated that we had succeeded in manipulating an optical correlate of displacement velocity. Interestingly *a posteriori* comparisons indicate a late convergence of the velocity profiles corresponding to the three Eye Height conditions in the *Path-Display* condition in comparison with the *No-Path-Display* condition (red zones in the Figure 46). While the velocity profiles can still be differentiated 3 seconds after the beginning of the trial in the *Path-Display* condition, the convergence appears earlier (after 2 seconds) in the *No-Path-Display* condition ($P < .05$).

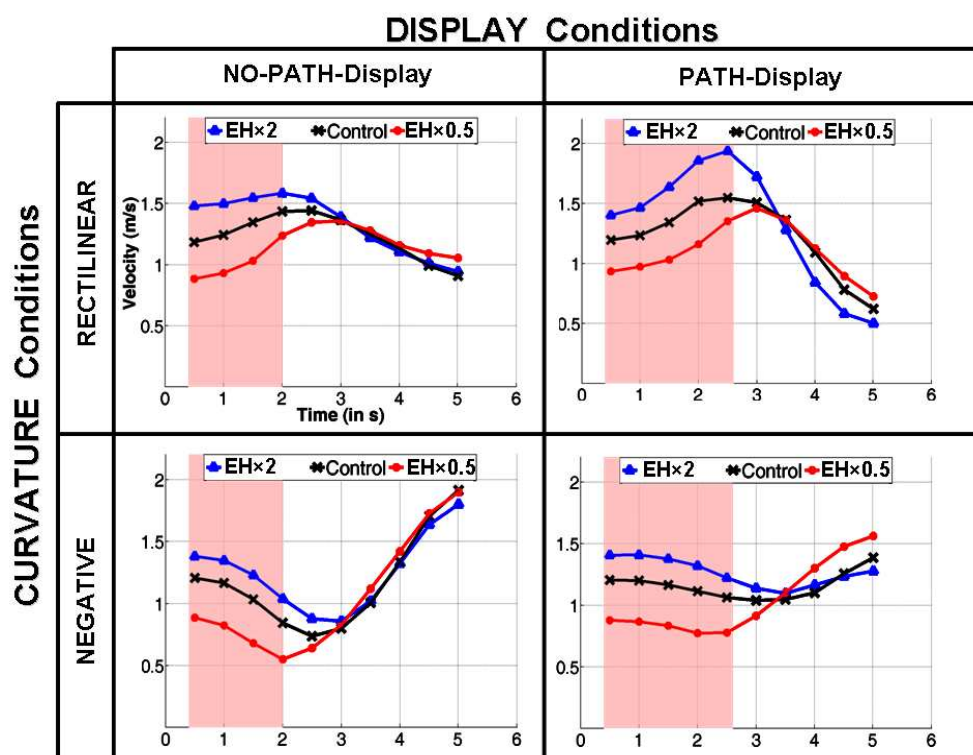


Figure 46 : The time course of the average walking speed produced as a function of the ball-path-Display, the ball path Curvature and the Eye Height (×, ▲ and ● symbols, correspond to veridical Eye Height, Eye Height multiplied by two and Eye Height divided by two, respectively). The red zone represents the time interval during which the velocity profiles can still be differentiated

DISCUSSION

In line with the previous work of Morice et al. (2010) and François et al. (*under review*), the aim of the present study was to question the operation of the MRV strategy in informationally enriched environments, through the manipulation of one of the constituting component of the strategy, i.e., an optical correlate of current displacement velocity. We asked participants to modify, if necessary, their displacement velocity so as to intercept with their head approaching virtual balls, while ball path curvature, ball path display and eye heights were manipulated. As shown by François et al. (*under review*), manipulating eye height should lead participants to misperceive self-motion speed and as a consequence to fail in the task when a MRV strategy is used to control the action. Moreover, in the case a MRV strategy would be used, ball curvature should not affect the regulation behavior of the participants and the velocity profiles exhibited for each eye height condition should be clearly distinguishable. The results provide mitigated support in favor of these predictions and will be discussed in the following sections.

Walking Task

In agreement with the results obtained by François et al. (*under review*)(see also Fajen, 2005b; Larish & Flach, 1990) manipulating eye height gave rise to specific displacement velocity changes illustrating the functional role played by GOFR in the visual control of locomotion speed. Decreasing eye height gave rise to an overestimation of walking speed (due to an increase of GOFR) and as a consequence to a slowing down of locomotion pace, while the opposite result was obtained in the case of an increase in eye height. This result is important as it demonstrates that we have succeeded in biasing self-motion speed in this experiment; as a consequence, if a MRV strategy is involved in the perceptual control of interceptive tasks, manipulating eye height should give rise to considerable changes at the level of both the overall performance and the displacement kinematics.

Interceptive Task

First of all the overall performance was found to be marginally affected by the display-conditions, with the participants producing a slightly better performance when the ball path

was depicted (81.7 % vs., 75.5 %). Remember that in the case the participants would use the MRV (in particular in the ball-display-condition) we expected large errors in the order of ± 0.8 m. At first sight, this result thus speaks against the operation of the MRV strategy whatever the path-display condition. The results also revealed several displacement velocity adjustments in the different experimental conditions that need to be considered in more detail.

Combined effects of ball path display and curvature on displacement kinematics

In the case a CBA strategy would operate in a normal, unmodified environment (i.e., no-path-display) the ball path curvature should affect displacement kinematics. Our results are in agreement with this prediction, with negative curvature giving rise to an overall decrease in displacement speed in the first part of the trial followed by an overall increase in speed in the second part of the trial. This result is in accordance with a number of recent studies in which ball path curvature was manipulated (e.g., Bastin et al., 2006b, 2008; Morice et al., 2010). When the ball-path is added to the environment a different picture emerges. While the operation of a MRV strategy would have led participants to exhibit the same displacement kinematics whatever ball path curvature, the displacement velocity profiles did differ over the curvature conditions. Even if these differences are smaller in comparison to the no-path-display condition (see also Morice et al., 2010) curvature clearly had an effect on displacement kinematics even when the trajectory is depicted. To conclude this section, while the results of the no-path-display condition unambiguously reflect the operation of a CBA strategy, the results of the path-display condition do not speak in favor of the exclusive use of given perceptual-motor strategy.

Effects of eye height manipulations on displacement kinematics

Manipulating eye height was particularly important in this study as it allowed us to de-correlate one of the constituting components of the MRV strategy. This manipulation was supposed to leave the behavior unaffected in the presence of a normal, unmodified environment but to affect displacement kinematics when ball path was depicted. The regulation behavior was indeed not affected by eye height manipulations in the no-path-display condition. This result strongly supports the operation of the CBA strategy (which is independent of eye height manipulations) in a normal, unmodified environment. Once again, in the path-display condition our results are less clear, even if the velocity profiles can still be

differentiated 3 seconds after the beginning of the trial, while the convergence of the velocity curves occur a second sooner in the no-path-display condition. This last result is compatible with the operation (at least at some point) of the MRV strategy when the environment is enriched.

CONCLUSION

Taken together our results clearly demonstrate the operation of a CBA strategy in the presence of a normal, unmodified environment. When ball path is depicted, we would like to advocate the use of a more complex strategy. The use of a pure MRV strategy should have led the participants to largely fail on the task when eye height was manipulated, but also to produce distinct velocity profiles during the overall trial. This last prediction was confirmed at least at the beginning of the trial (first 3 seconds), while the former is not. These results suggest that the participants' relied on a MRV strategy at the beginning of the trials and modified their displacement velocity accordingly up to a moment (around 2 s before head-ball contact) where it became clear that the current strategy would not allow them to succeed the task. The perceived inadequacy between the current regulation behavior and the adjustments required to succeed in the task probably drove the participants to use another strategy. In the end, this unexpected result mirrors once again the flexibility of the perceptual-motor organization underlying the control of goal-directed behavior, in the sense that not only different laws of control can operate depending on the informational content of the environment, but also that different laws of control can operate jointly during the completion of the task to the benefit of the participant. Examining the conditions of this complementarity offers a very challenging perspective for future work.

CHAPITRE 3

Un principe de contrôle et différents agents

1. Effet de l'âge sur un principe de contrôle

Age-related decline in sensory processing for locomotion and interception¹¹

ABSTRACT

The ability to control locomotion through the environment and to intercept, or avoid objects is fundamental to the survival of all locomotor species. The extent to which this control relies upon optic flow, visual direction cues or non-visual sensory inputs has long been debated. Here we look at the use of sensory information in Young and Middle-aged participants using a locomotor-driven interceptive task. Both groups of participants were asked to produce forward displacements in more or less impoverished environments by manipulating a joystick and to regulate, if necessary, their displacement velocity so as to intercept approaching targets. We show that the displacements produced by the Middle-aged participants were more nonlinear in comparison with Young participants. The errors in the Middle-aged group can be accounted for by a constant bearing angle (CBA) model that incorporates a decrease in the sensitivity of sensory detection with advancing age. The implications of this study to a better understanding of the mechanisms underlying the detection of the rate of change in bearing angle are discussed.

¹¹ François, M., Morice A.H., Blouin J. & Montagne, G. (*in press*), Age-related decline in sensory processing for locomotion and interception. *Neurosci* doi:10.1016/j.neuroscience.2010.09.020

INTRODUCTION

What perceptual-motor organization is involved in the control of goal-directed locomotion? This question has motivated a large number of studies over the last decade, which have led to important insights into the underlying mechanisms (e.g., Bastin, Craig, & Montagne, 2006b; Fajen & Warren, 2007; Rushton, Harris, Lloyd, & Wann, 1998; Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001; Wilkie & Wann, 2002). Taken together, these studies have shown that participants can take advantage of the perceptual information available in the perceptual flow produced by their displacements, so as to produce on line locomotor adjustments. This perceptual-motor dialogue can be formalized through task-specific laws of control linking a movement parameter to a perceptual information (Warren, 1988, 2006). The underlying idea of such laws, which express the circularity of the relations between information and movement, is that some invariant properties in the perceptual flow specify the current state of the relationship linking an agent to his/her environment. This dynamically updated relationship would allow functional locomotor adaptations to take place, which in turn would modify the perceptual flow, and so on and so forth.

Following this logic, specific laws of control have been shown to account for the regulation behavior of participants performing heading tasks (Warren et al., 2001; Wilkie & Wann, 2003), locomotor pointing tasks (Warren, Young, & Lee, 1986) or interceptive tasks (Chardenon et al., 2004). Interceptive tasks have deserved a special interest, not only because many daily activities rely on the ability to intercept and/or to avoid moving objects (in sport, in driving, or while walking in a crowded street), but also because they can provide insights about the central control of actions characterized by severe spatial-temporal constraints. It has been suggested that individuals intercepting moving targets rely on a law of control (Equation 1) which links the subjects' acceleration to the rate of change in bearing angle (Chapman, 1968; Chardenon, Montagne, Buekers, & Laurent, 2002; Lenoir, Musch, Thiery, & Savelsbergh, 2002, see Figure 47). The bearing angle corresponds to the angle subtended by the current position of the target and the direction of the subjects' motion. This type of strategy for controlling self-displacements during interceptive tasks is known as the constant bearing angle (CBA) strategy.

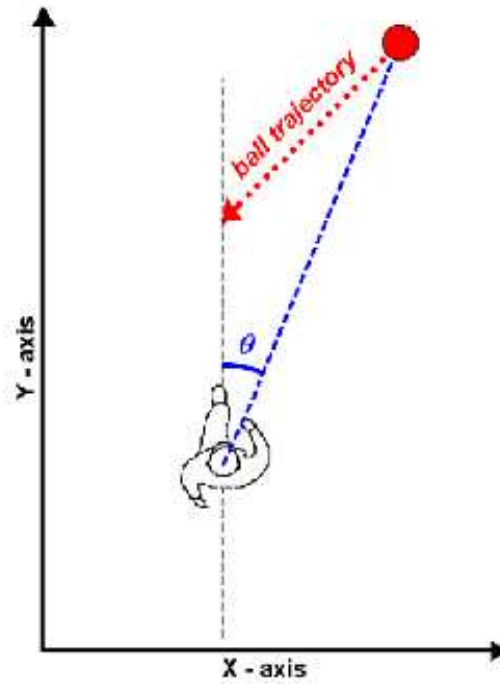


Figure 47 :Bird's eye view of the experimental layout. Participants produced forward displacements on a rectilinear path and aimed to intercept balls that crossed their displacement axis with an angle of 45° . Optical angle of interest is the bearing angle θ .

Using the CBA strategy, the moving object will be intercepted if the observer cancels any change in the bearing angle by accelerating or decelerating accordingly. An increase in bearing angle informs the participant that he/she will reach the interception point before the target and tells him/her to decelerate accordingly. Conversely, a decrease in bearing angle informs the participant that the object will reach the interception point before him/her and prompts him/her to accelerate accordingly. Finally when the bearing angle is kept constant, no change in velocity is required to intercept the target. The participant will intercept the moving object if he/she succeeds in maintaining his/her current velocity. The CBA strategy can be modeled by relating the participant's acceleration to the rate of change of the bearing angle, with a damping term allowing the system to match the required value smoothly and to avoid oscillations around the stable state (Bastin et al., 2006b; Fajen & Warren, 2003; Wann & Wilkie, 2004) (Equation 1):

$$\ddot{Y} = k_1 \times \frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}} \times \dot{\theta} + k_2 \times \dot{Y} \quad (\text{Equation 1})$$

In this equation, $\dot{Y}$ and $\ddot{Y}$ are the participant's speed and acceleration, respectively, $\dot{\theta}$ is the rate of change of the bearing angle, k_1 is a parameter that modulates the strength of the coupling between the acceleration and the rate of change of the bearing angle, and k_2 is a parameter that modulates the strength of the damping term. The function $\frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}}$ is an activation function.

The use of the CBA strategy has been evidenced in studies which have manipulated task constraints such as ball speed (Lenoir et al., 2002), angle of approach (Chardenon et al., 2005) or ball trajectory curvature (Bastin et al., 2006b). In these studies, the CBA model could explain as much as 80 % of the total kinematics variance. Interestingly, the CBA strategy can also explain children's (from 10 to 12 years old) locomotor behavior while intercepting moving balls (Chohan, Verheul, Van Kampen, Wind, & Savelsbergh, 2008) and locomotion produced by different animal species (fishes, dragonflies) while intercepting prey (Lanchester & Mark, 1975; Olberg et al., 2000)

Since the generalization of the CBA strategy appears well established, recent investigations have focused on the type of information that the brain uses for detecting the rate of change in bearing angle. The global optic flow field produced by the moving observer has been identified as a power source of information for detecting this rate of change (*optic flow signals*) (Chardenon et al., 2004). Indeed, because the focus of expansion specifies the direction of the observer's motion, an easy way to detect the bearing angle is to relate the current position of the mobile to the focus of expansion. The detection of the bearing angle remains possible, however, in the absence of optic flow, provided that the observer is able to relate the current position of the object to his/her midline body axis. This egocentric frame of reference is built through the integration of body-related signals, in particular those coming from the vestibular apparatus and from the extra-ocular and neck muscles (Blouin, Teasdale, & Mouchnino, 2007; Jeannerod, 1991; Paillard, 1987). Moreover, the accuracy with which participants refer a moving object with respect to their body can be improved when body-fixed visual references are present in the environment (e.g., a dashboard when driving, a handlebar when cycling; Wilkie & Wann, 2002).

Several studies have been designed to determine how the different sources of

information are integrated for detecting the rate of change in bearing angle (Chardenon et al., 2004; Fajen & Warren, 2004). These studies are all based on the same methodology which involves in rendering irrelevant a given source of information (e.g., the focus of expansion no more specifying the actual direction of displacement) and recording the behavioral consequences of this experimental manipulation. Such information manipulation has been achieved, for instance, by laterally displacing the ground plane during self displacement in virtual reality, so as to make irrelevant the position of the focus of expansion (Chardenon et al., 2004), by displacing visual landmarks materializing the midline body axis (Bastin & Montagne, 2005) and by vibrating the neck muscles (Bastin et al., 2006a) in order to bias the egocentric encoding of the target motion direction. Taken together, these studies have shown that the different perceptual signals contribute jointly to the detection of the rate of change in bearing angle. However, the weighting of the signals during this integrative process appears highly context-dependent. The optic flow signal would have the greatest weight when the visual environment is well structured (Bastin & Montagne, 2005; see Warren et al., 2001 for a similar result with heading tasks). In visually impoverished environments, the egocentric frame of reference would gain in importance (Bastin et al., 2006a).

It is worth noting that all the experiments reviewed so far put the emphasis on the perceptual-motor mechanisms allowing young adults to control goal-directed locomotion. In the present experiment, we focused on the much less documented effect of age on these control mechanisms. Ageing is generally associated with a decrease in performance in various sensorimotor tasks, including interceptive tasks (Spirduso & Mc Rae, 1990). This performance decline is known to appear even in moderately advanced age (e.g., 50-60 years, Sarlegna 2006). Factors contributing to the elders' deficit in intercepting moving objects could include increased perception thresholds in the detection of motion (Andersen & Enriquez, 2006; Tran, Silverman, Zimmerman, & Feldon, 1998; Warren, Blackwell, & Morris, 1989) especially for translational motion (Billino, Bremmer, & Gegenfurtner, 2008). Here we tested whether providing visual information that is known for being informative of the speed and direction of the participant's displacement (e.g., optic flow, body-fixed visual landmark) can help Middle-aged adults to compensate, at least partly, for the deteriorating effect of ageing during an interception task. We also tested young adults for comparison. The second (related) aim of the experiment was to test to what extent the bearing angle strategy (Equation 1) could account for the locomotor adjustments produced by the two groups of participants.

METHOD

Participants

Fourteen females, self-declared right-handed and having normal or corrected-to-normal vision participated to the experiment. They were divided into two experimental groups: Young ($N = 8$, 23.8 ± 2.1 years old) and Middle-aged ($N = 6$, 57.8 ± 2 years old) adults. The subjects gave their informed consent before participating in the experiment. They all had normal or corrected-to-normal vision. A local ethics committee approved the experimental protocol.

Apparatus

The virtual reality set-up (Figure 48) consisted of two PC Dell workstations (Optiplex GX 240), a joystick (Saitick AV8R), a Barco video-Projector (BARCO IQ R500, refreshing rate: 60 Hz) and a 2.3-m high $\times$ 3-m wide projection screen. The visual scene was projected on the screen, placed 0.70 m in front of the seated participants (providing a $117^\circ \times 130^\circ$ field of view). Participants held an analog 2-directions joystick in their right hand with their arm resting on a table. Participants could increase (decrease) their forward acceleration by pushing (pulling) the joystick from the neutral initial position up to an acceleration (deceleration) of 0.75 m/s^2 (-0.75 m/s^2). Resulting speed was bounded from -0.8 m/s to 3.2 m/s , corresponding to the human span of walking speed. When the joystick remained in neutral position, no acceleration or deceleration occurred, allowing to keep the current velocity constant. Participants wore glasses to prevent them from seeing both the joystick and their own hands. The position of the joystick was sampled at 200 Hz and sent to a host computer which computed on-line the position of the participant in the virtual world. From this position data, the visual scene was projected onto the screen by the video projector.

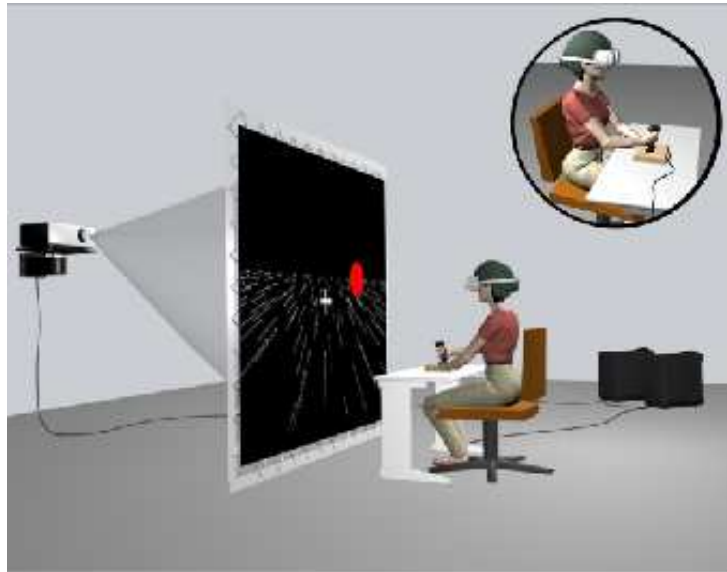


Figure 48 : General overview of the virtual reality set-up. Participants seated in front of a large projection screen and controlled their displacement acceleration via a joystick. Resulting velocity was integrated and coupled to the projected visual scene, so that visual scene displacements were proportional to the participants' current speed. Participants wore goggles that prevented them from seeing the joystick position.

Experimental procedure

The experiment was divided into three sessions. The first session allowed the participants to calibrate themselves with the joystick action and with its visual consequences. In this 3-minutes session, participants were immersed in a virtual corridor and were instructed to regulate their velocity so as to keep a constant distance between them and a large virtual textured ball (2 m diameter) rolling on the floor along a straight line at varying velocities (from 0.52 to 3.82 m/s). All participants showed no difficulties in performing this task.

The second session was designed to familiarize the participants with the experimental task. Participants were asked to produce forward displacements in the virtual environment and were instructed to intercept the targets (red untextured spheres, 0.22 m diameter), which moved toward them obliquely (i.e., 45° prior to the participant's displacement) at eye level. They were simply instructed to regulate their velocity in order to intercept the targets with their head when the targets crossed their displacement axis. At the end of each trial, the participants were informed of the distance separating their head from the ball when it crossed their axis of displacement. Positive and negative signs were given when the ball crossed the axis in front or behind the participants, respectively. This session lasted 10 minutes.

The third session was the experimental session and task requirements remained unchanged compared with the task familiarization session. However, no knowledge of results regarding the participants' performance was provided.

Independent variables

In both the familiarization and experiment tasks, we manipulated the offset of the ball (three levels). The three different offset modalities (-2.5 m, +0.2 m and +2.5 m) corresponded to three different initial ball-to-participant distances along the Y axis (5.5 m, 8.2 m and 10.5 m). The offset conditions were used to vary the target arrival position along the subject's displacement axis (Figure 49A), diminishing the possibility of predicting the interception point from the start of the trial, and favoring thus the online control of the displacement velocity. As consequences of the three offsets, keeping the initial displacement velocity (set at 1 m/s) unchanged, would result in the ball passing respectively 0.2 m and 2.5 m in front of the head of the participants for the 8.2 m and 10.5 m initial ball distances, and 2.5 m behind their head in the 5.5 m initial distance.

We also manipulated the visual content of the virtual Environment (four levels) in both the familiarization and experiment tasks. In the so-called *Empty* condition, only the ball was visible (Figure 49B). In this condition, the bearing angle could only be determined by relating retinal information of the target to extra-retinal signals (e.g., proprioception and oculomotor). In the hereinafter called *Landmark* condition, a grey cross (0.2 m × 0.2 m) depicting the midline body axis (which coincided with the axis of displacement) appeared on the screen at about shoulder level. The presence of a body-fixed landmark is believed to enhance the egocentric frame of reference. In the *Ground* condition, the ground plane was textured (extensionless, randomly distributed dots, 0.65 dots/m²), allowing participants the use of the optic flow to control their displacements. Finally, the cross and the textured ground plane were displayed in the *Full* condition, making available all previously cited visual and non-visual sources of information. The 12 experimental conditions (3 Offsets × 4 Environments) were repeated ten times each, giving rise to a total of 120 trials, randomly presented for each participant. The experimental session lasted approximately 30 minutes.

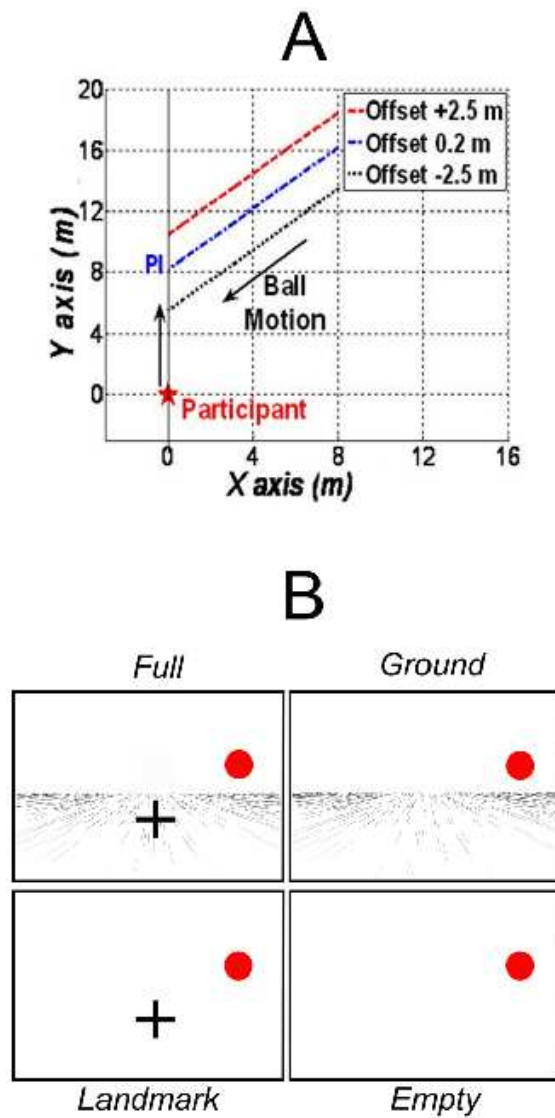


Figure 49 : (A) Bird's eye view of the ball trajectory and interception points (IP) as a function of the three offset conditions (in dotted, plain and dashed line for the -2.5, +0.2 and +2.5 m offset conditions, respectively). (B) Representation of the different environment conditions (Empty, Landmark, Ground and Full). Screenshots are depicted with inversed colors.

Data analysis and dependent variables

The data were analyzed with regard to performance outcome, movement kinematics and perceptual-motor strategies involved.

Performance.

Performance was computed in two different ways. The final Y-positions of participants along the Y-axis were cumulated and the percentages of trials displaying undershoots or an

overshoots of the interception point (IP) were computed. The absolute error (AE) was computed in two different ways. The absolute error was computed as the minimal Euclidian distance between the center of the head and the center of the ball (1) at the moment at which the ball crossed the axis of displacement (i.e., 8 s after the ball appearance) or (2) at any moment during the trial.

Kinematics.

The time series of individual velocity ($\dot{Y}$) profiles were averaged over intervals of 500 ms giving rise to 16 time intervals (see Bastin et al., 2006b; Bastin, Jacobs, Morice, Craig, & Montagne, 2008; Morice, Francois, Jacobs, & Montagne, 2010 ; Warren et al., 2001, for a similar methodology). Individual mean acceleration ($\ddot{Y}$) profiles were also computed and analyzed so as to identify the number of zero-crossings ($ZC_{\ddot{Y}}$). The number of zero crossings reflects the smoothness of a trajectory as it reveals the number of successive acceleration/deceleration cycles during the displacement. For each trial, we picked out the number of zero crossings (from 1 to 5) and we classified the trial accordingly. For each subject, the number of trials found in each category was expressed as a percentage of the total number of $ZC_{\ddot{Y}}$, so as to compare the two groups of participants.

Perceptual-motor strategy.

Two types of analyses were performed to test how participants relied on the rate of change of the bearing angle. A rate of change of the bearing angle that remains null during the course of a trial would be in agreement with the use of the CBA strategy. To determine whether the participants used such a strategy to control their displacement during the interceptive task, we first examined the time course of the first derivative of the bearing angle ($\dot{\theta}$) and to what extent their values were kept constant by the Young and Middle-aged participants.

We thus computed the second derivative of the bearing angle ($\ddot{\theta}$) and looked at the time at which it crossed zero ($ZC_{\ddot{\theta}}$)¹² and also reported the corresponding values of $\dot{\theta}$ at the $ZC_{\ddot{\theta}}$ times.

Subsequent analyses compared the kinematics predicted by the CBA model with the observed kinematics computed by averaging individual displacement velocity profiles recorded for each group. Predicted kinematics were obtained as follow. The best-fitting set of parameters k_1 and k_2 (Equation 1) were first determined separately for each Offset, Environment and Group. Forty hundred combinations of parameter values were used (k_1 was varied from -0.95 to 0 in increments of 0.05 and k_2 from 0 to 0.95 in increments of 0.05) to solve Equation 1 with a Runge–Kutta procedure¹³. The initial mean position and speed of the participant and target were used as input variables. Numerical simulations were done on the complete trial duration (i.e., 8 s). The goodness of the observed data's fits provided by predicted kinematics were investigated through both the percentages of variance accounted for (R^2) and the Sum of Squares Error (SSE) between the predicted and observed curves. Predictions were thus obtained for each group and experimental condition. Secondly, the best set of k_1 and k_2 parameters, common for all offset conditions, but customized to each group and each environment was determined separately by comparing the SSE between best predicted and observed kinematics.

Statistics

For each dependant variable, individual mean values were submitted to analyses of variance (ANOVA).

Discrete variables (Absolute Error (AE) and Zero Crossings ($ZC_{\ddot{\theta}}$))

The effect of both Group and Environment factors on AE and $ZC_{\ddot{\theta}}$ individual means computed from the healthy participants were tested with two-ways ANOVAs (2 Groups $\times$ 4

¹² Zero-crossings of the second derivative of the bearing angle ($ZC_{\ddot{\theta}}$) reveal changes occurring in the dynamics of the first derivative of the bearing angle.

¹³ We used the automatic step-size Runge-Kutta-Fehlberg integration method provided by the “ode23” Matlab[®] function.

Environments) with Groups [Young, Middle-aged] as a between-participants factor and Environments [Full, Ground, Landmark and Empty] as a within-participants factor.

Kinematics

Separate three-ways ANOVAs with Environments [Full, Ground, Landmark and Empty], Offsets¹⁴ [-2.5, 0.2 and +2.5] and Time Intervals [16 intervals] as within-participant factors were performed on displacement velocity profiles for each group separately (i.e., Young, Middle-aged).

Partial effect sizes were computed (η_p^2) and post hoc comparisons were conducted using Newman-Keuls tests. The p value for statistical differences was set at 0.05¹⁵.

Predictions

Because different visual and non-visual sources of information may influence the detection of the rate of change in bearing angle, specific predictions can be made if the participants rely on a CBA strategy depending on the visual content of the environment and the groups of participants. The literature revealed that the different types of perceptual signals are redundant as they allow interceptive tasks to be performed whatever the perceptual content of the environment. Young adults should be able to perform the task with a good accuracy whatever the environment. Middle-aged participants should exhibit a general decrease in their overall performance due to the well-documented increased perception thresholds inducing an impairment in their capacity for detecting motion. Nevertheless, the availability of several sources of information in the rich condition could allow them to compensate, at least partly, this deterioration. Finally it is also reasonable to anticipate that the behavior produced by the Middle-aged participants should be jerkier than the behavior

¹⁴ As mentioned previously, the manipulation of the offset factor was introduced in order to favor the online control of the displacement velocity. As a consequence, no effect of the offset factor on performance was expected and this factor was not included from statistical analyses. Conversely, an effect on kinematics was expected and the factor offset was introduced in the analyses.

¹⁵ 10 % of trials performed by each population were excluded from all analyses (trials with an AE > 1.1 m for Young and Middle-aged participants). All remaining trials (successful and unsuccessful) were used in the analyses.

produced by Young participants.

RESULTS

Performance

The panel A of the Figure 50 depicts the frequency distributions of participant's final Y-positions (i.e., participant's positions along the Y-axis at time $t=8$ s, when the ball crossed the participant's displacement axis) cumulated across trials for the three offset conditions as compared to the position of the Interception Point (IP equal to 5.5, 8.2 and 10.5 m for the -2.5, +0.2 and +2.5 m Offset conditions). For all Offset conditions, the frequency distributions of Young participant's final Y-positions display sharpen peaks, spreading over 0.5 m forward and backward to the IP, whereas the middle aged distributions of final Y-positions were relatively flat and were spread up to 2 m forward and backward the IP. Distributions of final Y-positions show that, in average, Young participants slightly less overshoot the IP (final Y-positions equal to 5.60, 8.32 and 10.6 m) than did Middle-aged participant's (final Y-positions equal to 5.69, 8.38 and 10.63 m). Such overshoot occurred more often for Young participants than for Middle-aged participant's (71.63 vs. 58.29 % of trials). More generally, such distributions of trials, in which the IP was sometimes overshoot and sometimes undershot (especially for Middle-aged participants) do not indicate a systematic bias toward the IP.

The panel B of Figure 50 displays the absolute errors (AE) computed in two ways for the two groups in the different Environment conditions. We first considered absolute errors as the Euclidian distance between the agent and the ball at the moment at which the ball crossed the participant's displacement axis (dotted bars). This criterion indicated that Young participants were able to intercept the targets with their head at time $t = 8$ s as instructed (mean AE equal to 0.14 m) whereas Middle-aged participants were only able to virtually catch the targets with their arms (mean AE equal to 0.43 m). To control that Middle-aged participants succeeded in the task by overcoming the instructions and by only attempting to intercept targets at any moment of the trials, we also computed absolute error as the minimum Euclidian distance between the agent and the ball at any moment during the overall trial course (plain bars).

The ANOVA (2 Groups $\times$ 4 Environments) performed on the AE mean values (computed with the latter definition) revealed a significant main effects of Group

($F_{(1, 12)} = 134.41, p < .05, \eta_p^2 = 0.92$) and Environment ($F_{(3, 36)} = 11.57, p < .05, \eta_p^2 = 0.49$). The Environment $\times$ Group ($F_{(3, 36)} = 6.25, p < .05, \eta_p^2 = 0.34$) interaction was also significant. Post-hoc analysis revealed that Young participants were more accurate than Middle-aged participants (0.10 ± 0.03 m vs. 0.26 ± 0.03 m) showing thus that, because the latter errors were appreciatively similar to a head diameter, Middle-aged participants succeeded in the task. *A posteriori* comparisons also revealed that, while the performance of Young participants did not significant vary between the different environments ($p > .05$), Middle-aged participants were more accurate in the *Full* environment than in the other environments and were the least accurate in the *Empty* environment (0.21 m $\pm$ 0.03 , 0.26 m $\pm$ 0.01 , 0.26 m $\pm$ 0.04 and 0.31 m $\pm$ 0.05 m for the *Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty* conditions, respectively; $p < .05$).

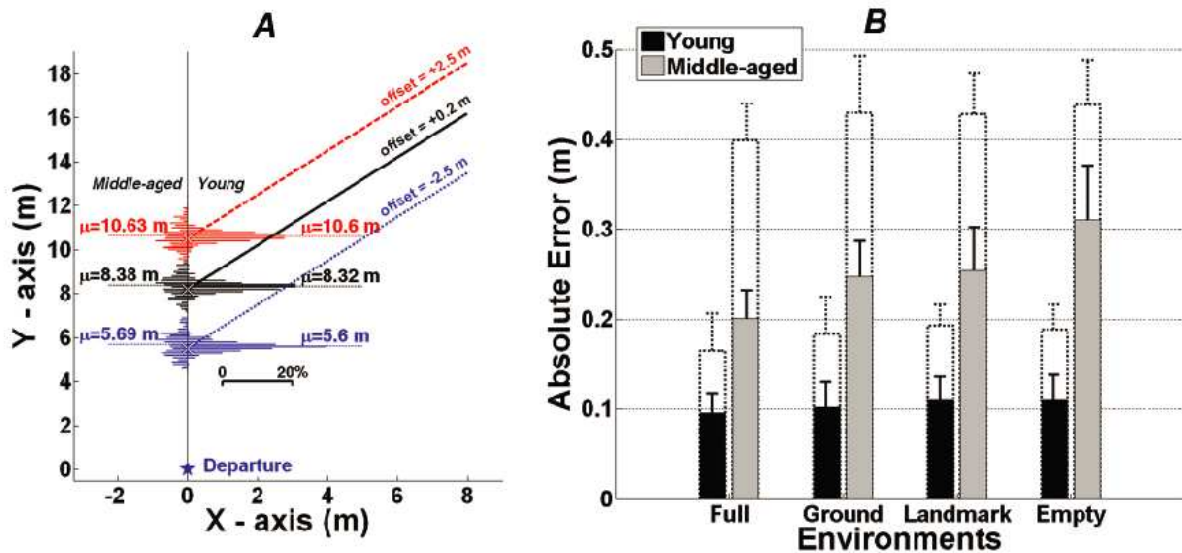


Figure 50 : (A) Frequency distribution of participant's final Y-positions (i.e., participant's positions along the Y-axis at time $t=8$ (s), when the ball crossed the participant's displacement axis) binned each 0.1 m and cumulated across trials performed in the four Environment conditions for the two groups of participants and for the three offset conditions (-2.5, +0.2 and +2.5 m). The distributions of Young and Middle-aged participant's final Y-positions are depicted on the right and left sides of the displacement axis, respectively. The horizontal scale (from 0 to 20%) describes the frequency at which final Y-positions occurred for each bin. The average values of final Y-positions (μ) are reported and depicted with a dotted line. (B) Absolute Error as a function of Environment conditions (*Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty*) for each Group (Young, Middle-aged). Two computations of Absolute Error are displayed in B. The plain bars depict the absolute error computed from the agent-ball distance at time $t=8$ (s). The additional dotted bars represent the absolute error computed from the minimum of the agent-ball distance across the overall time-course of the trial. Vertical bars depict the standard deviation of mean values

Kinematics

Three-ways repeated measures ANOVAs (4 Environments $\times$ 3 Offsets $\times$ 16 Time Intervals) on velocity profiles (Figure 51A) were performed separately for both groups of participants (*cf.* Table 1).

Table 1 : Results of the three-ways ANOVAs (4 Environments $\times$ 3 Offsets $\times$ 16 Time Intervals) performed on displacement velocity separately for each Groups of participants (Young, Middle-aged).

	Groups			
	Young		Middle-aged	
	ANOVA	η^2_p	ANOVA	η^2_p
<i>Offset</i>	$F_{(2, 14)} = 51608.2, p < .05^*$	0.99	$F_{(2, 10)} = 1986.46, p < .05^*$	0.99
<i>Environment</i>	$F_{(3, 21)} = 8.04, p < .05^*$	0.53	$F_{(3, 15)} = 4.25, p > .05$	0.46
<i>Time</i>	$F_{(15, 105)} = 6.03, p < .05^*$	0.46	$F_{(15, 75)} = 2.73, p < .05^*$	0.35
<i>Environment $\times$ Offset</i>	$F_{(6, 42)} = 0.84, p > .05$	0.11	$F_{(6, 30)} = 1.93, p > .05$	0.28
<i>Offset $\times$ Time</i>	$F_{(30, 210)} = 18, p < .05^*$	0.72	$F_{(30, 150)} = 4.62, p < .05^*$	0.48
<i>Environment $\times$ Time</i>	$F_{(45, 315)} = 5.87, p < .05^*$	0.46	$F_{(45, 225)} = 0.39, p > .05$	0.07
<i>Offset $\times$ Environment $\times$ Time</i>	$F_{(90, 630)} = 0.61, p > .05$	0.08	$F_{(90, 450)} = 0.42, p > .05$	0.08

Young participants. Analyses performed on individual mean velocity profiles revealed significant main effects of Offset ($p < .05$, $\eta^2_p = 0.99$), Environment ($p < .05$, $\eta^2_p = 0.53$) and Time Interval ($p < .05$, $\eta^2_p = 0.46$). Moreover, both the Offset $\times$ Time Intervals ($p < .05$, $\eta^2_p = 0.72$) and Environment $\times$ Time Intervals ($p < .05$, $\eta^2_p = 0.46$) interactions were also significant. *A posteriori* comparison revealed that significantly different velocity profiles were produced in the three Offset conditions during the last 6 seconds of the trial ($p < .05$) (Figure 51A). The velocity changes were in accordance with the task requirements, with positive offset conditions giving rise to a higher overall displacement velocity in comparison with the negative offset conditions, and with intermediate offset conditions giving rise to intermediate

displacement velocity profiles ($p < .05$). Moreover, Young participants produced similar displacement velocity profiles in all environment conditions ($p > .05$) except during the very last Time interval (i.e., close to ball contact) in which the velocity produced in the *Empty* condition was higher than that produced in the other conditions.

Middle-aged participants. Analyses performed on individual mean velocity profiles revealed significant main effects of Offset ($p < .05$, $\eta^2_p = 0.99$) and Time Intervals ($p < .05$, $\eta^2_p = 0.35$) but no significant main effect of Environment ($p > .05$, $\eta^2_p = 0.46$). Moreover, Offset $\times$ Time Intervals ($p < .05$, $\eta^2_p = 0.48$) interaction was also significant. *A posteriori* comparisons revealed that significantly different velocity profiles were produced in the three Offset conditions during the last 6 seconds of the trial ($p < .05$) (Figure 51A). Once again the velocity changes were in accordance with the task requirements. Moreover it is worth noting that contrary to the other participants, the Middle-aged participants decelerated systematically at the very beginning of the trial, whatever the offset conditions, before producing adaptive velocity changes.

Taken together, these results show that the velocity profiles exhibited by both Young and Middle-aged groups of participants are highly affected by the Offset but only marginally by the Environment. At a more descriptive level, it is also worth noting that the velocity adaptations produced by Young participants are very smooth, contrary to those produced by Middle-aged participants. One can finally notice that the Middle-aged participants sometimes even produced backward displacements in the negative offset condition which was never produced by Young participants.

We further analyzed the displacement kinematics by counting the number of zero crossings ($ZC_{\ddot{y}}$) exhibited in the acceleration profiles. The number of $ZC_{\ddot{y}}$ is indicative of whether the displacement adaptations are gradual (very few $ZC_{\ddot{y}}$) or conversely nonlinear (numerous $ZC_{\ddot{y}}$) (Figure 51B).

Two-way ANOVA (4 Environments $\times$ 2 Groups) with repeated measures on the Environment factor performed on the individual mean number of $ZC_{\ddot{y}}$ performed by Young and Middle-aged groups of participants revealed a significant main effect of Group ($F_{(1, 12)} = 5.20$, $p < .05$, $\eta^2_p = 0.99$), but no significant main effect of the Environment factor ($F_{(3, 36)} = 0.3$, $p > .05$, $\eta^2_p = 0.02$). Young participants produced less $ZC_{\ddot{y}}$ than the Middle-aged ones (2.60 ± 0.63 vs. 2.99 ± 0.39).

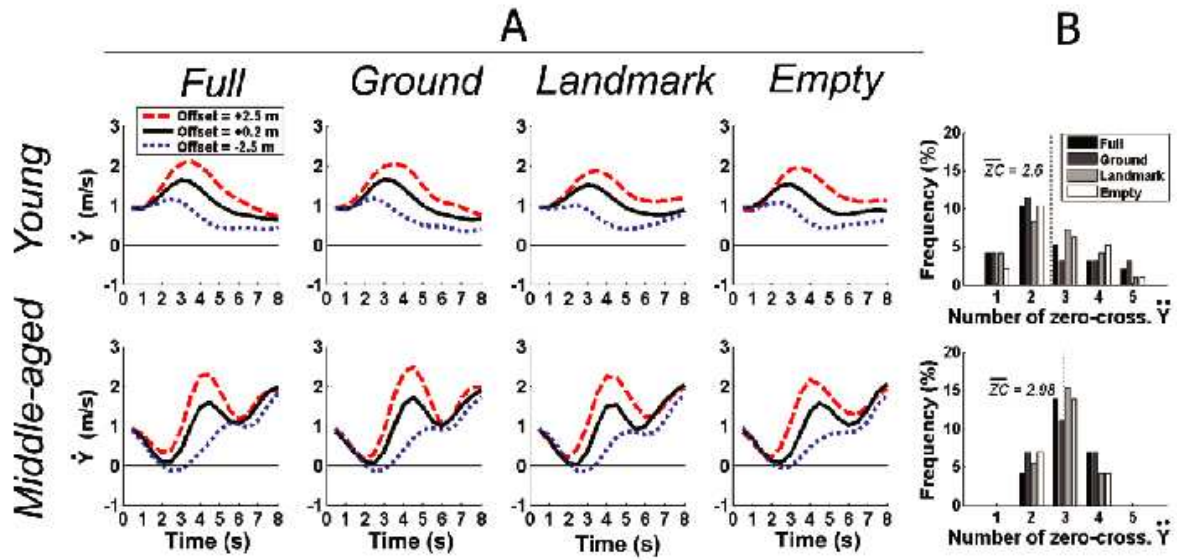


Figure 51 : (A) Displacement velocity profiles exhibited by the two groups of participants (Young, Middle-aged) in the four environment conditions (*Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty*). (B) Average frequency of zero crossings acceleration ($ZC\ddot{y}$) occurrence (from 1 to 5 by trial on average) cumulated over participants. The mean values are reported with a dotted line.

Perceptual-motor strategy

In order to investigate to what extent the constant bearing angle strategy can account for the velocity profiles previously described for the two groups of participants, we analyzed the time course of the bearing angle's first derivative ($\dot{\theta}$) for Young (Figure 52, panel A) and Middle-aged participants (Figure 52, panel B) in the three offset conditions¹⁶. Qualitative inspection of the time course of the rate of change of the bearing angle ($\dot{\theta}$) did not show linear profiles, as predicted by the CBA strategy when intercepting balls approaching along straight paths, but rather wave-like profiles. These $\dot{\theta}$ profiles differed with ageing concerning its average values, times at which peaks and valleys occurred and finally amplitudes between peaks and valleys. Concerning the average values of $\dot{\theta}$ profiles, the main panels of Figure 52 show that whereas Young participants kept in average $\dot{\theta}$ values above zero (around 0.76, 0.96 and 1.00°/s for the -2.5, +0.2 and +2.5 offset conditions, respectively), Middle-aged participants let the values of $\dot{\theta}$ evolving below zeros (around -1.38, -0.99 and -0.67°/s for the -2.5, +0.2 and +2.5 offset conditions, respectively) until the last second of trials. Then, the

¹⁶ Given that ball paths were identical and that velocity profiles of Young and Middle-aged did not significantly differ between environment conditions, we averaged the time course of the bearing angle's first derivative across environment conditions at each 0.5 s interval.

rate of change of the bearing angle suddenly increased above zero¹⁷. Such negative values of the rate of change of the bearing angle during the first 7 s indicate that Middle-aged participants were late compared to the target displacements during the main part of the trials. Note also that the middle values of $\dot{\theta}$ profiles are affected by the offset conditions, especially for Middle-aged participants.

Times at which peaks and valleys occurred in individual $\dot{\theta}$ profiles and amplitudes between these peaks and valleys were then analyzed by computing the zero-crossing exhibited by the second derivative of the bearing angle ($ZC_{\ddot{\theta}}$) in individual profiles. This allowed us to determine when Young and Middle-aged participants conducted $\dot{\theta}$ values toward its average values and to what extent they kept $\dot{\theta}$ values constant.

Times at which peaks and valleys occurred in individual $\dot{\theta}$ profiles were analyzed by plotting below each panel of the Figure 52, the frequency distributions of $ZC_{\ddot{\theta}}$ as a function of corresponding trial time for Young and Middle-aged participants. These distributions of $ZC_{\ddot{\theta}}$ plotted as a function of trial time showed that, when excluding the first and last 0.5 s, Young participants adjusted the $\dot{\theta}$ values at two times (around 3.5 s and 6.5 s) before reaching the interception point. On the other hand, Middle-aged participants performed adjustments of $\dot{\theta}$ values at three times (around 2.5, 4 and 6 s). The frequency distributions $ZC_{\ddot{\theta}}$ as a function of trial time consequently well mirrored the number of zero crossings exhibited by both groups in their acceleration profiles (see previous analyses of $ZC_{\ddot{\gamma}}$).

Amplitudes between peaks and valleys displayed by Young and Middle-aged participants were analyzed by plotting on the right of each panel of the Figure 52 the frequency distributions of $ZC_{\ddot{\theta}}$ as a function of corresponding $\dot{\theta}$ values in individual profiles. Interestingly, the frequency distributions of $ZC_{\ddot{\theta}}$ as a function of $\dot{\theta}$ values display an obvious bimodal distribution for both Young and Middle-aged participants, in which higher and lower modes corresponds to the bounds within which $\dot{\theta}$ values are kept during the trial. However, the amplitude between the values of higher and lower modes differs with ageing. Indeed, for Young participants, $\dot{\theta}$ values are comprised between higher and lower

¹⁷ The final asymptote described by the bearing angle's first derivative is an unrealistic artifact that occurs for very near targets due to the use of trigonometrical functions. As a consequence, the features of the bearing angle's first derivative that occurred during the last second of trials were not considered.

values equal to $+0.75^\circ/\text{s}$ and $-0.25^\circ/\text{s}$. On the contrary, for Middle-aged participants, $\dot{\theta}$ values are comprised between higher and lower values equal to $+0.5^\circ/\text{s}$ and $-2.75^\circ/\text{s}$. As a consequence, Young participants allowed $\dot{\theta}$ values to vary within bounds distant of $1^\circ/\text{s}$ whereas Middle-aged participants allowed $\dot{\theta}$ values to vary within bounds distant of $3^\circ/\text{s}$. Taken together, these results demonstrate that participants punctually controlled their velocity when the values of $\dot{\theta}$ exceeded some bounds, otherwise the values of $\dot{\theta}$ gradually drifted. This principle allowed participants to keep $\dot{\theta}$ values constant within a window. Because the amplitude spreading the bounds of the windows differed with Groups, these results suggest that these windows or bounds can feature some perceptual thresholds, which could be damaged with ageing.

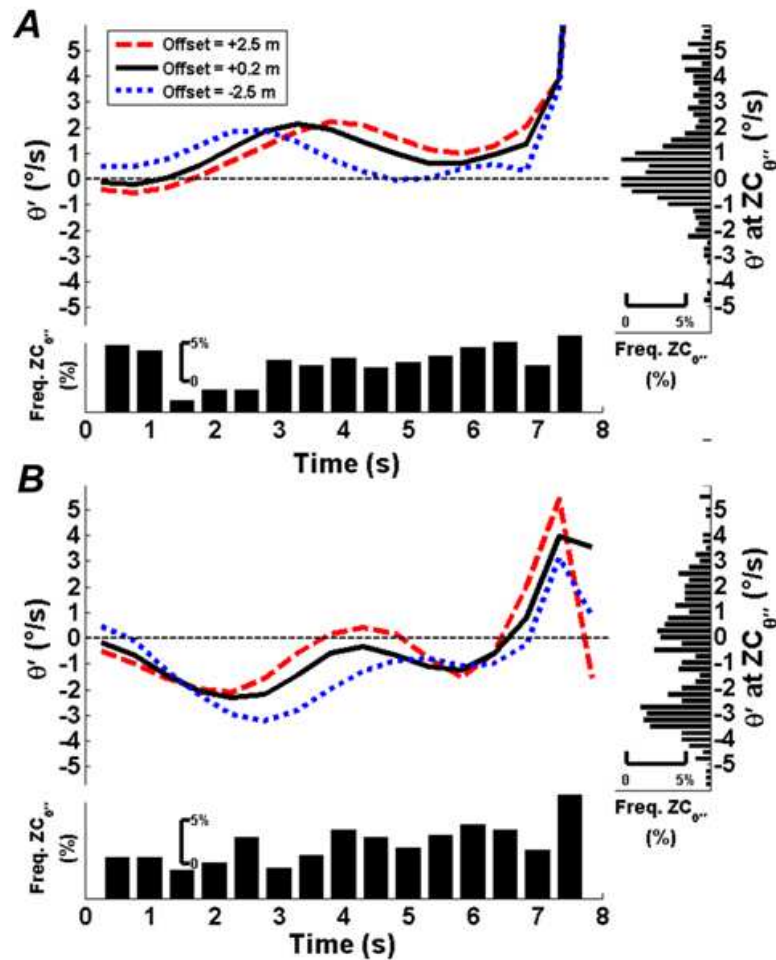


Figure 52 : Time-course over trial time of the bearing angle's first derivative ($\dot{\theta}$, in $^\circ/\text{s}$) averaged across participants and Environment Conditions in the three Offset conditions (in dotted, plain and dashed lines for the -2.5, +0.2 and +2.5 m offset conditions, respectively) for the two Groups of participants (Panel A and B for Young and Middle-aged participants, respectively). Histograms below the X-axis depict the time (binned each 0.5 s) at which the second derivative of the bearing angle ($\ddot{\theta}$) crossed zero ($ZC_{\ddot{\theta}}$). Histograms on the right depict the values of $\dot{\theta}$ (binned each $0.1^\circ/\text{s}$) when $ZC_{\ddot{\theta}}$ occurred in individual $\dot{\theta}$ profiles.

Subsequent analyses were based on systematic comparisons between the mean velocity profiles produced by each group of participants and the best fitting numerical simulations provided by the CBA model (Equation 1). Table 2 summarizes the best-fitting set of parameters (k_1 , k_2) and best goodness-of-fit criteria (R^2 , SSE) found for each group of participants and for each Environment and Offset conditions. These analyses reveal that the numerical simulations of the CBA model provide a good account of the velocity profiles produced by Young participants in all conditions ($R^2 > 0.82$) (see Table 2 and Figure 53). Conversely, they failed to approximate the regulation behavior exhibited by Middle-aged participants ($R^2 < 0.69$). In particular, it appears that the current version of the CBA model cannot account for their non-gradual velocity profiles.

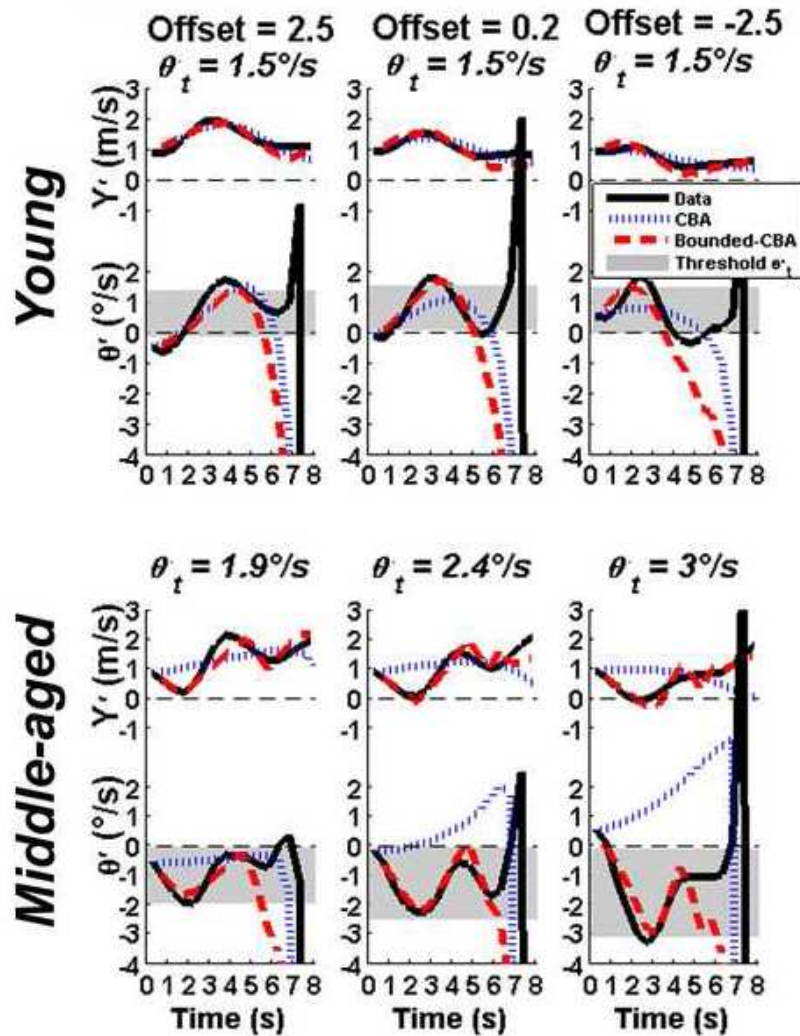


Figure 53 : Average observed velocity ($\dot{Y}$) and corresponding first derivative of the bearing angle ($\dot{\theta}$) (plain lines) and best fitting numerical simulations provided by the CBA (dotted line) and “Bounded-CBA” models (hatched line) for the two Groups of participants (Young, Middle-aged) in the three offset conditions (-2.5, +0.2 and +2.5 m) for the *Empty* environment condition. The perceptual thresholds providing the best fit ($\dot{\theta}_t$) are include in title.

Table 2 : Best-fitting set of parameters (including k_1 , k_2 and the perceptual threshold $\dot{\theta}_t$ expressed in $^\circ/s$) and goodness-of-fit criterions (R^2 and Sum of Squared Errors (SSE) expressed in m^2/s^2) found for each model (CBA and “bounded-CBA”) and each group (Young, Middle-aged) in the different Environment conditions (*Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty*) and in the three Offset conditions (-2.5, +0.2 and +2.5 m). Empty gray cells indicate that $\dot{\theta}_t$ is not taken into account in the CBA model. Goodness-of-fit criterions were evaluated on the 0-7 s trial duration.

			Young			Middle-aged		
			$k_1 = -0.40$ $k_2 = 0.30$			$k_1 = -0.10$ $k_2 = 0.10$		
CBA	Environment	Offset	$\dot{\theta}_t$	R^2	SSE	$\dot{\theta}_t$	R^2	SSE
	Full	-2.5		0.94	0.22		fail	7.95
	Full	+0.2		0.94	0.25		fail	5.32
	Full	+2.5		0.96	0.34		0.63	4.10
	Ground	-2.5		0.95	0.20		fail	8.16
	Ground	+0.2		0.93	0.30		0.19	4.67
	Ground	+2.5		0.95	0.32		0.62	5.78
	Landmark	-2.5		0.82	0.28		fail	7.66
	Landmark	+0.2		0.91	0.21		fail	5.70
	Landmark	+2.5		0.86	0.57		0.67	4.11
	Empty	-2.5		0.87	0.22		fail	7.38
	Empty	+0.2		0.85	0.33		fail	5.20
	Empty	+2.5		0.87	0.54		0.69	3.47
	Mean ($\pm$ std)			0.90 (± 0.05)	0.31 (± 0.12)		0.56 (± 0.21)	5.79 (± 1.63)
Bounded-CBA	Environment	Offset	$k_1 = -0.60$ $k_2 = 0.60$			$k_1 = -0.45$ $k_2 = -0.05$		
	Full	-2.5	1.5	0.87	0.56	1.9	0.63	2.26
	Full	+0.2	1.5	0.93	0.48	2.4	0.84	1.67
	Full	+2.5	1.5	0.96	0.35	3	0.95	0.73
	Ground	-2.5	1.5	0.85	0.64	1.9	0.85	1.24
	Ground	+0.2	1.5	0.92	0.50	2.4	0.86	1.69
	Ground	+2.5	1.5	0.97	0.29	3	0.95	1.26
	Landmark	-2.5	1.5	0.96	0.46	1.9	0.85	1.23
	Landmark	+0.2	1.5	0.94	0.61	2.4	0.79	2.04
	Landmark	+2.5	1.5	0.90	0.56	3	0.95	0.75
	Empty	-2.5	1.5	0.97	0.33	1.9	0.90	0.80
	Empty	+0.2	1.5	0.92	0.68	2.4	0.87	1.32
	Empty	+2.5	1.5	0.89	0.57	3	0.88	1.49
	Mean ($\pm$ std)		1.5	0.92 (± 0.04)	0.50 (± 0.13)	2.43 (± 0.47)	0.86 (± 0.09)	1.37 (± 0.49)

It is worth noting that the CBA model is based on very simple control architecture and presents a number of shortcomings from a neuro-physiological point of view. For instance, according to the CBA model, the participant is supposed to cancel any change in bearing angle whatever the magnitude of these changes. This appears as a major limitation for generalizing the model to older populations because the perceptual thresholds are known to increase with ageing (Andersen & Enriquez, 2006; Tran et al., 1998; Warren et al., 1989). Adding a perceptual threshold in the perception of the rate of change in the bearing angle could therefore constitute a good way to improve the CBA model and to account for the jerky behavior produced by Middle-aged participants.

This led us to revise the initial formulation of the CBA model (Equation 1) and to propose a “Bounded-CBA” model (Equation 2). The “Bounded-CBA” rests on a new, neuro-physiologically grounded, control architecture that comprises two modes. According to this model, the “control” mode gives rise to a behavioral adaptation in velocity each time the rate of change of the bearing angle is greater than a threshold in perceiving $\dot{\theta}$ (thresholds values were deduced from the analyses reported in Figure 52). Conversely, the “drift” mode is used when angular changes do not exceed the given threshold, and consequently the system maintains the previous velocity until it gets greater than the given threshold, and so on. More precisely, in the “Bounded-CBA” model, the ratio between the current value of the rate of change in bearing angle $\dot{\theta}$ and an assumed perceptual threshold $\dot{\theta}_t$ in perceiving angular change of the bearing angle acts as a switch function that alternatively activates the “control” and “drift” modes. When the absolute value of the ratio $\dot{\theta}/\dot{\theta}_t$ exceeds 1, then the acceleration of the participant ($\ddot{Y}$) is driven by the rate of change in bearing angle and the damping of the system. If the absolute value of the ratio $\dot{\theta}/\dot{\theta}_t$ is less than 1, then the simulated acceleration ($\ddot{Y}$) continues to be gradually driven by the acceleration prescribed at $t - 1$.

$$\ddot{Y} = \begin{cases} k_1 \times \frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}} \times \dot{\theta} + k_2 \times \dot{Y}, & \text{if } |\dot{\theta}/\dot{\theta}_t| > 1 \\ \ddot{Y}_{t-1}, & \text{if } |\dot{\theta}/\dot{\theta}_t| < 1 \end{cases} \quad (\text{Equation 2})$$

According to this new “Bounded-CBA” model architecture, for a given set of initial conditions, higher perceptual thresholds should give rise to jerky velocity changes, while low

thresholds should give rise to smooth regulations (Figure 54). A best-fitting procedure identical to the one used for the CBA model was applied to the “Bounded-CBA” model. The parameter k_1 was varied from -0.95 to 0 in increments of 0.05 and k_2 from -0.1 to 0.95 in increments of 0.05 to solve Equation 2. Moreover we also included a search on the perceptual threshold parameter ($\dot{\theta}_t$) ranging from 0°/s to 4°/s with 0.1°/s increments. The best fitting sets of k_1 , k_2 and $\dot{\theta}_t$ values identified in the four Environments and three Offset conditions for the two groups are reported in Table 2. Interestingly, the best perceptual thresholds values accounting for the regulation behavior of both Middle-aged and Young participants greatly differed (2.5 vs. 1.5°/s), but they did not vary very much across the environment conditions. Moreover, numerical simulations of the “Bounded-CBA” model showed that for Middle-aged participants, perceptual thresholds values changed with the Offset conditions (1.4, 2.9 and 3°/s for the -2.5, +0.2 and 3 m Offset conditions).

Figure 53 shows the best-fitting numerical simulations provided by the “Bounded-CBA” model (Equation 2) for each group of participants and Offset conditions in the *Empty* Environment. Contrary to the original CBA model, the “Bounded-CBA” model provides a good account of the velocity profiles not only for Young participants but also for the Middle-aged participants in all conditions (R^2 mean values > 0.85 and > 0.63 , for Young and Middle-aged participants, see Table 2).

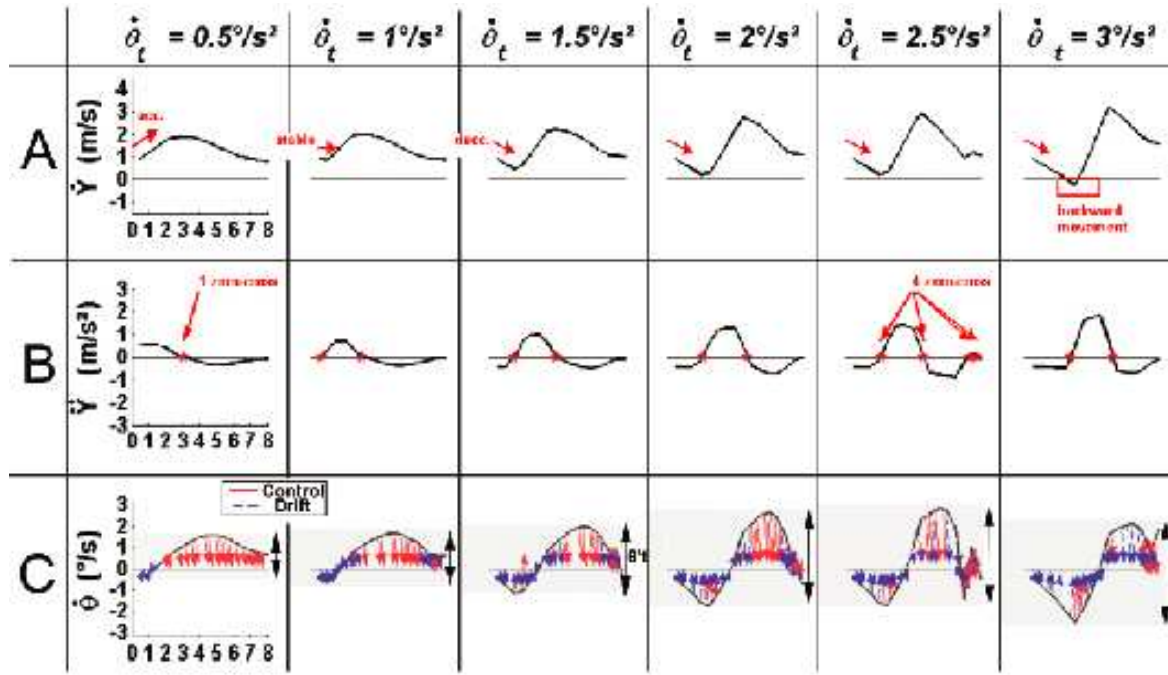


Figure 54 : Numerical simulations of the displacement velocity ($\dot{Y}$, in m/s, Panel A), the corresponding acceleration ($\ddot{Y}$, in m/s², Panel B) and the rate of change of the bearing angle ($\dot{\theta}$, in °/s, Panel C) provided by the “Bounded-CBA” model when setting the $\dot{\theta}_t$ boundaries from 0.5 to 3°/s by 0.5°/s steps (from left to right, respectively). Note that initial conditions, k_1 and k_2 parameters remain unchanged in the six simulations. (Panel A) Whereas a $\dot{\theta}_t$ value set at 0.5°/s induces an initial acceleration, increasing the $\dot{\theta}_t$ value to 1°/s induces a stable initial velocity. Setting the $\dot{\theta}_t$ value to 1.5°/s or higher produces an initial deceleration. Finally, critical $\dot{\theta}_t$ values (up to 3°/s) produce not only initial deceleration but also backward displacement. Manipulating only the $\dot{\theta}_t$ value can thus mimic the velocity profiles shown by either Young and Middle-aged participants. (Panel B) The number of zero-crossing of simulated displacement acceleration increases with the $\dot{\theta}_t$ value in a given time. Critical $\dot{\theta}_t$ values (up to 3°/s) induce less zero-crossing due to the limited time of simulation. (Panel C) The arrows depict the influence of the two different modes of control that compete in the “Bounded-CBA” model. Red arrows depict a classical control of velocity slaved by the rate of change of the bearing angle. This mode of control occurs punctually when the current value of $\dot{\theta}$ exceeds the assumed perceptual $\dot{\theta}_t$ threshold. Blue arrows represent a second mode of control, called drift, during which the velocity drift until the current value of $\dot{\theta}$ is above the $\dot{\theta}_t$ threshold. The combined influences of both modes of control (“control” and “drift”) tend to cancel $\dot{\theta}$. As the $\dot{\theta}_t$ values increases, the balance between the two modes of control tends to become more equally distributed.

DISCUSSION

We used a virtual reality set-up to assess the effect of age in the control of self-displacement while intercepting moving balls. The two groups of participants (Young, Middle-aged) could be differentiated according to the errors they produced while attempting

to intercept the moving ball, but also according to their displacement kinematics. Young participants reached the impact location with greater accuracy than the Middle-aged participants. Moreover, while the Young participants produced smooth displacements whatever the experimental conditions, the Middle-aged participants exhibited jerkier displacements. While being able to explain the regulation behavior of Young participants, the CBA model failed to explain the behavior observed by the Elders. Interestingly however, adding adjusted perceptual thresholds in the numerical simulations allowed the model to provide a good account of the behavior produced by the two groups of participants in all environment conditions.

Confirmation of previous studies

The majority of the studies devoted to the understanding of the perceptual-motor mechanisms underlying the control of interceptive actions are derived from studies performed on young and healthy adults (e.g., Bastin et al., 2008; Chardenon et al., 2004; Fajen & Warren, 2004; Lenoir et al., 2002). The results obtained with our Young group are in perfect agreement with the results obtained in these studies. Young participants maintained their high level of performance across the different environment conditions, with smooth velocity adjustments distributed over the entire trial duration. Moreover the Constant Bearing Angle model provided a very good account of these adaptations. The ability of Young participants to maintain their level of performance, even in the more impoverished environment condition, confirms that extra-retinal signals allow the participants to detect the rate of change in bearing angle (Bastin et al., 2006a; Bastin & Montagne, 2005). Including Middle-aged individuals in the present study allows us to determine the effect of a degradation in the processing of visual and non-visual signals on the interception performance.

The influence of ageing

The overall decrease in performance exhibited by Middle-aged participants is in agreement with the results obtained in previous studies (Spirduso & McRae, 1990); however, these studies have not assessed performance in different visual environments. The present study reveals that the type of environment in which the virtual displacements occurred has an influence on the elders' performance. Remarkably, the condition allowing them to have

access to the three types of manipulated perceptual variables (i.e., the *Full* condition) gave rise to the best performance level. Various studies have shown that ageing is accompanied by a deterioration of motion detection and perception thresholds (Andersen & Enriquez, 2006; Morgan & King, 1995; Tran et al., 1998; Warren et al., 1989; Zhang et al., 2008), especially for translational motion as in the present study (Billino et al., 2008). It is then reasonable to hypothesize that the detection of the rate of change in bearing angle is easier when redundant information is available. In addition to their failure to intercept the moving ball with the same accuracy as the young adults, the Middle-aged participants clearly exhibited jerkier motion regulation than the Young participants, irrespectively of the environment conditions. We presume that the decline in pure motor functions that is generally observed with ageing (e.g., muscular power, Voelcker-Rehage, 2008) cannot account for these decline in elders' performance, as our virtual reality interceptive task put little motor constraints on the participants. The decrease performance of Middle-aged participants in the present study more likely resulted from the slowing of information processing that is generally observed with ageing (Salthouse, 2000; Welford, 1988) and the increase motion detection and perception thresholds reported above. In accord with this hypothesis, adding a perceptual threshold in a Bounded version of the CBA model allowed the model to both qualitatively and quantitatively better fit the Middle-aged participants' behavior. It is worth noting that the values of perceptual thresholds determined from average participant's data as well as the values that provided the best fits consistently showed two relevant results. First, a reduced sensitivity to detection of changes in bearing angle was shown for Middle-aged participants. Indeed, Middle-aged adults presented larger range of thresholds than young adults ($\sim 3^\circ/s$ and $\sim 1^\circ/s$, respectively). Values were found to be similar to those already identified in several psychophysical studies which explored the effect of aging on motion detection, motion perception, angular velocity detection and speed discrimination thresholds of target or vehicle (Bowman & Brown, 1989; Brenner & van den Berg, 1996; McKee & Nakayama, 1984; McKee, Silverman, & Nakayama, 1986; Snowden & Kavanagh, 2006). Moreover visual sensitivity to detection of changes in bearing angle was found to be lower for larger initial retinal eccentricity of the ball that had to be intercepted¹⁸, especially for Middle-aged participants. Such effect of the eccentricity of targets was already observed in the literature (Bowman & Brown, 1989; Fahle & Wehrhahn, 1991; Monaco, Kalb, & Johnson, 2007).

¹⁸ In our study, eccentricity was equal to 30.65, 26.28 and 23.38° regarding to the axis of displacement in the -2.5, +0.2 and +2.5 m offset conditions, respectively

CBA and “Bounded-CBA” models

One of the objectives of the present work was to question the relevance of the constant bearing angle model in accounting for the regulation behavior of Young and Middle-aged participants. One strength of this model is the simplicity of the underlying architecture which links the perceptual information (the rate of change in bearing angle) to an action parameter (the displacement acceleration) with a damping term indexed to the displacement velocity (Equation 1). While the CBA model has been shown to account for the regulation behavior of Young participants in a very wide range of experimental conditions, the present study challenged the CBA model with Middle-aged participants, presumably presenting neurophysiological deteriorations due to aging. This study shows that a CBA-like model can account for the regulation behavior of Middle-aged participants, provided the architecture of the model incorporates an additional constraint, neurophysiologically grounded. Indeed, adding a perceptual thresholds-like parameter to the CBA model allowed the model to account for the difficulties encountered by the participants to detect the changes in bearing angle (Equation 2).

CONCLUSION

This study supports the status of the constant bearing angle strategy as a perceptual-motor principle being able to account for the regulation behavior of participants that are characterized with large individual differences and moving in different visual environments. It also illustrates the flexibility of our perceptual systems which provide redundant degrees of freedom allowing the same task to be performed with a good accuracy, whatever the sources of information available. Finally, combining behavioral organizational principles (i.e., CBA strategy) with neurophysiological constraints (i.e., perceptual threshold) is in accord with the increasing trend of the scientific community to propose models that are physiologically grounded.

Chapitre 3: Un principe de contrôle et différents agents

2. Influence du mode d'accès proprioceptif sur un principe de contrôle

Coping with decline of visual and proprioceptive sensory processing in interception

Abstract

We investigated the contribution of proprioceptive information to the human ability to perform interceptive action on the basis of the Constant Bearing Angle strategy (CBA) depending on the availability of visual allocentred and/or egocentred perceptual-motor variables in the visual environment. In an experiment run in virtual reality, a deafferented patient (Patient GL) and age-matched healthy control participants (Middle-Aged) were required to control their forward velocity with a joystick in order to intercept ball moving toward them obliquely. Participants were exposed to four visual environments that provided either allocentred and egocentred perceptual-motor variables (*Full Environment*), only allocentred (*Ground Environment*), only egocentred (*Landmark Environment*) or none of them (*Empty environment*). The results indicated that the Patient GL experienced more difficulties in performing the task, in comparison with Middle-Aged participants. Moreover, Patient GL produced much more jerky velocity adaptations in comparison with Middle-Aged participants. The “Bounded-CBA” model, taking into account putative increased perceptual thresholds due to ageing and pathology provided a better account of the regulations exhibited by the Middle-Aged and the Patient GL than the original CBA model in the different environment conditions. The implications of this study to a better understanding of the mechanisms underlying the detection of the rate of change in bearing angle are discussed.

INTRODUCTION

How can a given perception-action mechanism be used by living agents through life despite age and pathology-related decline in sensory processing? We tried to answer to this question by focusing on the respective contribution of proprioception and vision to perform interceptive actions on the basis of the '*Bounded - Constant Bearing Angle (Bounded-CBA)*' strategy formulated by Francois, Morice, Blouin et Montagne (in press). We investigated the performance and kinematics of the Deafferented Patient GL and his/her Middle-Aged healthy counterparts' depending on the availability of visual allocentred and/or visual egocentred perceptual-motor variables.

In the perception-action framework (Gibson, 1998), the success of goal directed actions is guaranteed when living agents (i.e., humans, animals) take advantage of the perceptual information available from the visual and proprioceptive sensory signals produced by their displacements, so as to produce on-line locomotor adjustments. Such on-line coupling between movement and information has been formalized through task-specific laws of control (Warren, 1988, 2006). These laws of control rely on the assumption that the perceptual information picked up by agents specify the current state of the relationship linking an agent to his/her environment and thus informs he/she about the direction of regulation to produce so as succeeding in the considered task. In other words, agents would use an information that allow the perception of invariant properties of the agent-environment relationship in order to produce functional locomotor adjustments', which in turn would modify the information, and so on and so forth. Task-specific laws of control have been evidenced to account for the regulation behavior of participants in heading tasks (Warren, Kay, Zosh, Duchon, & Sahuc, 2001; Wilkie & Wann, 2003), locomotor pointing tasks (Warren, Young, & Lee, 1986) or interceptive tasks (Bootsma, Fayt, Zaal, & Laurent, 1997; Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2004).

Interceptive tasks have deserved a special interest, not only because many daily activities rely on the ability to intercept and/or to avoid moving objects (in sport, in driving, or while walking in a crowded street), but also because they can provide insights about the central control of actions characterized by strong spatio-temporal constraints. It has been suggested that observers intercepting moving targets rely on a law of control called '*Constant Bearing Angle (CBA)*' strategy. The CBA strategy allows succeeding in interceptive action by performing on-line regulation of kinematics in order to cancel the value of the rate of change of the bearing angle, that is the angle subtended by the current position of the target to

be intercepted and the direction of the observer' motion (Chapman, 1968; Chardenon, Montagne, Buekers, & Laurent, 2002 ; Lenoir, Musch, Thiery, & Savelsbergh, 2002, see Figure 55).

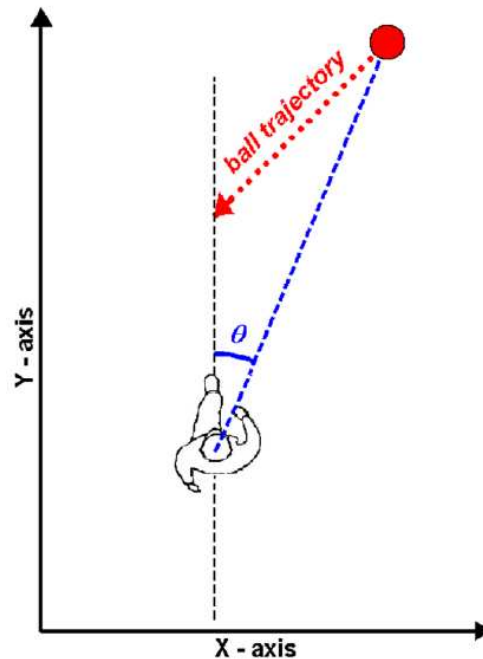


Figure 55: Top view of the agent-environment relationship during interceptive actions. Participants produce forward displacements on a rectilinear path and aim to intercept balls that cross their displacement axis with an angle of 45° . Optical angle of interest for the Constant Bearing Angle strategy is the bearing angle θ .

The principle of the CBA strategy holds that the rate of change of the bearing angle ($\dot{\theta}$) directly specify to the observer if its current velocity will allow him/her to intercept moving target or if velocity regulations (i.e., acceleration or deceleration) are necessary. A positive $\dot{\theta}$ (i.e., an increase of the bearing angle as a function of time) informs the observer that the target will cross his/her axis of displacement behind him/her and tells him/her to decelerate accordingly. Conversely, a negative $\dot{\theta}$ (i.e., a decrease of the bearing angle) informs the observer that the target will pass his/her axis of displacement in front of him/her and prompts him/her to accelerate accordingly. Finally when $\dot{\theta}$ is null (i.e., the bearing angle is kept constant as a function of time), no participant's acceleration or deceleration is required to intercept the target. The use of the CBA strategy has been evidenced by revealing specific signatures of human kinematics when task constraints such as ball speed Chardenon, Montagne, Laurent, & Bootsma, 2005; Lenoir et al., 2002), angle of approach (Chardenon et al., 2005) or ball trajectory curvature (Bastin et al., 2006b) were manipulated. In these studies, the CBA strategy was modeled by relating the participant's acceleration to the rate of change

of the bearing angle ($\dot{\theta}$, Equation 1), with a damping term allowing the system to match the required value smoothly and to avoid oscillations around the stable state (Bastin et al., 2006b; Fajen & Warren, 2003; Wann & Wilkie, 2004). Then, modeling kinematics according to the CBA law of control could explain as much as 80 % of the total kinematics variance.

$$\ddot{Y} = k_1 \times \frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}} \times \dot{\theta} + k_2 \times \dot{Y} \quad \text{Equation 1}$$

In this equation, $\dot{Y}$ and $\ddot{Y}$ are the participant's speed and acceleration along the Y-axis (*cf.*, Figure 55), respectively, $\dot{\theta}$ is the rate of change of the bearing angle, k_1 is a parameter that modulates the strength of the coupling between the acceleration and the rate of change of the bearing angle, and k_2 is a parameter that modulates the strength of the damping term. The function $\frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}}$ is an activation function. Interestingly, the CBA strategy seen to be exploited by a large span of living agent ranging from children (from 10 to 12 years old) intercepting moving balls (Chohan et al., 2008) to animal species (fishes, dragonflies) intercepting prey (Lanchester & Mark, 1975; Olberg et al., 2000).

From a perceptual view point, two different frames of reference have been suggested in order to sort the different sensory modalities and perceptual variables that could be used by agent to detect $\dot{\theta}$: (a) an allocentric frame of reference is used when target angular position is determined in relation to invariant properties of the environment surrounding the target and/or (b) an egocentric frame of reference is used when the angular position of the ball is determined in relation to the position of the body. On the one hand, visual signals provide at least two perceptual variables allowing to perform an allocentric detection of $\dot{\theta}$. The first visual variable identified as a power source of information for detecting $\dot{\theta}$ is provided by the global optic flow field produced by the moving observer. The global optic flow field contains a visual property, the Focus of Expansion (FoE), that invariantly specifies to the observer his/her direction of motion. Thus, an easy way to perform interceptive action consists in cancelling the current angular position of the target regarding to the FoE. Other visual variables can be used to encode $\dot{\theta}$ if the visual environment contains a structured background. For instance, moving so as to keep the same distant object occluded by the target would also lead to the interception of the target (in this case, θ and $\dot{\theta}$ are kept around null values). On the other hand, both proprioceptive and visual signals can be used to perform an egocentric detection of $\dot{\theta}$. Indeed, proprioception coming from the vestibular apparatus, the extra-ocular

muscles and/or from neck muscles (Blouin et al., 2007; Jeannerod, 1991; Paillard, 1987) provides body-related-signals that could be used as a reference frame for detecting the angular position of the ball. Thus, an easy way to perform interceptive action consists in cancelling the current angular position of the target regarding to the body midline axis. Vision can also provide a perceptual variable when body-fixed visual references, or landmarks are present in the environment (e.g., a dashboard or a car's bonnet when driving, a handlebar when cycling) (Wilkie & Wann, 2002).

From a sensory processing point of view, the weighting of the visual and proprioceptive signals for encoding $\dot{\theta}$ appears highly context-dependent. Taken together, the following studies have shown that not only the different sensory modalities (i.e., vision, proprioception) but also different perceptual variables provided by a sole sensory signal (i.e., FoE, Landmark) contribute jointly to the detection of the rate of change in bearing angle. The visual allocentric encoding of $\dot{\theta}$ would have the greatest weight when the visual environment is well structured (Bastin & Montagne, 2005; see Warren et al., 2001 for a similar result with heading tasks). In visually impoverished environments, the proprioceptive egocentric encoding of $\dot{\theta}$ would gain in importance (Bastin et al., 2006b). Moreover, the accuracy with which participants use a visual egocentric encoding of $\dot{\theta}$ can be improved when body-fixed visual references are present in the environment (Wilkie & Wann, 2002).

From a methodological view point, studies that have been designed to determine how sensory modalities (i.e. vision, proprioception) and perceptual-motor variables (i.e., FoE, Landmark) are integrated for detecting $\dot{\theta}$ are all based on the same experimental paradigm consisting in decorrelating a given source of information from the property specified (i.e. rendering irrelevant a given source of information informing the participant about its axis of displacement/body axis) and recording the behavioral consequences of this experimental manipulation. Decorrelation has been tested with visual signals allowing the allocentric detection of $\dot{\theta}$. In this case, the FoE has been decorrelated from the actual direction of displacement by laterally displacing the ground plane during self displacement in virtual reality (Chardenon et al., 2004). Decorrelation has been tested with visual signals allowing the egocentric detection of $\dot{\theta}$. For instance, decorrelating a visual variable from its specification of the midline body axis has been achieved by laterally displacing visual landmarks materializing the midline body axis (Bastin & Montagne, 2005). Decorrelation has finally been tested with proprioceptive egocentric encoding of $\dot{\theta}$. For instance, decorrelating a

proprioceptive variable from the actual midline body axis has been achieved by vibrating the neck muscles (Bastin et al., 2006a).

Studying specific populations of humans (e.g., Young vs. Middle-Aged) might provide interesting insight in the understanding of flexibility of sensory processing. Recently Francois, Morice, Blouin et Montagne (in press) have shown that Middle-aged participants continue to exploit the CBA strategy despite age-related decline in their sensory accuracy. More precisely, the authors showed that participant's kinematics could be modeled by the CBA strategy provided that some perceptual thresholds accounting for aged-related decline in visual and proprioceptive encoding of $\dot{\theta}$ are integrated in the CBA model architecture. Studies of deafferented human patients might provide complementary piece of answer to the understanding of sensory processing flexibility through life. If proprioception from the neck muscles for instance is only required for detecting $\dot{\theta}$, one could ask whether these patients are able to intercept moving balls in impoverished visual environments and to achieve interception scores similar to those of age-matched healthy control. If the performance differs between the healthy subjects and these patients, this would indicate the importance of non-visual information for detecting the bearing angle. On the other hand, similar ability to intercept a moving object between the healthy and the Patients would attest to the power of visual information in the control of self-displacement.

In the present study, we run an experiment in virtual reality in which participants were required to intercept ball moving toward them obliquely. The first aim of the study was to test the importance of the proprioceptive egocentric detection of $\dot{\theta}$ depending on the kind of visual information available (i.e., both egocentric and allocentric, only allocentric, only egocentric, none of them), we compared the performance and kinematics of a deafferented Patient GL suffering from a severely impaired egocentric frame of reference to his/her *Middle-Aged* counterparts in a virtual interceptive task. The second (related) aim of the study was to test to what extent the 'Bounded Constant Bearing Angle' strategy formulated by Francois et al. (in press) could account for the locomotor adjustments produced by the deafferented Patient GL.

METHOD

Participants

Seven females, self-declared right-handed and having normal or corrected-to-normal vision participated to the experiment. They were divided into two experimental groups: a deafferented Patient GL with large-fibre sensory neuropathy ($N = 1$, 59 years old, called 'Patient GL') and age-matched healthy control ($N = 6$, 57.8 ± 2 years old, called 'Middle-Aged'). At the age of 31, after a severe sensory polyneuropathy, the *Patient GL* incurred the loss of the large myelinated fibers. Since then, she has an acute loss of all somatosensory modalities (*e.g.*, kinesthesia, tendon reflexes, touch, vibration and pressure) from her nose to her feet, thus including the cervical region. Her vestibular system remained normal as attested by vestibulo-ocular reflex measurement (Blouin, Vercher, Gauthier, Paillard, Bard, & Lamarre, 1995) and her efferent motor pathways are also normal. Although confined to a wheelchair, the *Patient GL* can perform most daily activities with concentration and visual feedback. Due to her impaired egocentric frame of reference, however, her motor performance decreases in visually unstructured visual environments (Blouin, Bard, Teasdale, Paillard, Fleury, & Forget, 1993). A detailed clinical history of the *Patient GL* have been published elsewhere (Cooke, Brown, Forget, & Lamarre, 1985; Forget & Lamarre, 1995). All participants gave their informed consent before participating in the experiment. A local ethics committee approved the experimental protocol.

Apparatus

The virtual reality set-up is depicted on Figure 56. Participants seated 0.70 m in front of a 2.3-m high $\times$ 3-m wide projection screen ($117^\circ \times 130^\circ$ field of view) and held an analog 2-directions joystick (Happ Controls, Inc. in Elk Grove Village, IL, United States) in their right hand¹⁹ with their arm resting on a table. Participants could increase (decrease) their forward acceleration by pushing (pulling) the joystick from the neutral initial position up to an acceleration (deceleration) of 0.75 m/s^2 (-0.75 m/s^2). Resulting speed was bounded from -0.8 m/s to 3.2 m/s (*i.e.*, $\approx$ human span of walking speed). When the joystick remained in neutral

¹⁹ Despite allowing 2D movements, sole the frontward/backward movements of the joystick gave rise to visual consequences in our VR apparatus.

position, no acceleration or deceleration occurred and the current velocity was kept constant. Participants wore goggles to prevent them from seeing both the joystick and their own hands. The acceleration provided by the joystick was sampled at 200 Hz and sent in real time to an acquisition system (ADwin-Pro, Keithley Instruments, Inc., Cleveland, OH, United States) that allowed a first host computer to integrate twice time the acceleration signal provided by the joystick in order to compute on-line the position of the participant in the virtual world. This position data was sent to a second host computer which generated the visual scene and rear-projected it onto the projection screen by the video projector (IQ R500, Barco, Inc., Duluth, GA, United States).

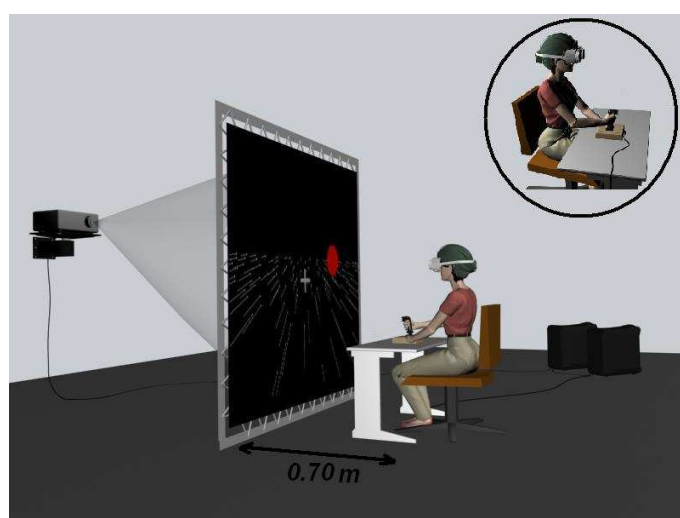


Figure 56 : Virtual reality set-up for ball interception used in the experiment. Participants seated in front of a large projection screen and controlled their displacement acceleration via a joystick. Resulting acceleration was integrated two times and coupled to the rear-projected visual scene. All participants wore goggles that prevented them from seeing their hand and the joystick position. The Patient GL' hand was fixed to the joystick by mean of a Velcro so that she always grasped the joystick despite never seeing it.

Experimental procedure

The experiment was divided into three sessions. The first session allowed the participants to calibrate themselves with the joystick action and with its visual consequences. In this 3-minutes session, participants were immersed in a virtual corridor and were instructed to regulate their velocity so as to keep a constant distance between them and a large virtual textured ball (2 m diameter) rolling on the floor along a straight line at varying velocities (from 0.52 to 3.82 m/s). All participants showed no difficulties in performing this task.

The second session was designed to familiarize the participants with the experimental task. Participants were asked to produce forward displacements in the virtual environment and were instructed to intercept the balls (red untextured spheres, 0.22 m diameter), which moved toward them obliquely at eye level. They were simply instructed to regulate their velocity in order to intercept the balls with their head when the balls crossed their displacement axis. At the end of each trial, the participants were informed of the distance separating their head from the ball when it crossed their axis of displacement. Positive and negative signs were given when the ball crossed the axis in front or behind the participants, respectively. This session lasted 10 minutes.

The third session was the experimental session and task requirements remained unchanged compared with the task familiarization session. However, no knowledge of results regarding the participants' performance was provided.

Independent variables

In both the familiarization and experiment tasks, we manipulated the offset of the ball (three modalities: -2.5 m, +0.2 m and +2.5 m). The three different offset modalities corresponded to three ball arrival position along the subject's displacement axis (i.e., 5.5, 8.2 and 10.5 m in front of the participant departure, Figure 57A), diminishing thus the possibility of predicting the interception point from the start of the trial, and favoring thus the online control of the displacement velocity. As consequences of the three offsets modalities, keeping the initial displacement velocity (set at 1 m/s) unchanged, would result in the ball passing respectively 0.2 m and 2.5 m in front of the head of the participants for the +0.2 m and +2.5 m offset modalities, and 2.5 m behind their head in the -2.5 m offset modalities.

We also manipulated the visual content of the virtual Environment (four modalities: *Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty*) in both the familiarization and experiment tasks. In the *Empty* condition, only the ball was visible (Figure 57B). In the *Landmark* condition, a grey cross (0.2 m × 0.2 m) depicting the midline body axis (which coincided with the axis of displacement) appeared on the screen at about shoulder level. In the *Ground* condition, the ground plane was textured (extensionless, randomly distributed dots, 0.65 dots/m^2). Finally, in the *Full* condition, the cross and the textured ground plane were displayed. The 12 experimental conditions (3 Offsets × 4 Environments) were repeated ten times each, giving rise to a total of 120 trials. Finally, Experiment 1 was composed of 120 trials, randomly

presented for each participant: (12 trials $\times$ 3 Offsets[-2.5, +0.2, +2.5 m] $\times$ 4 Environments[*Full*, *Ground*, *Landmark*, *Empty*]) and spent 30 minutes long.

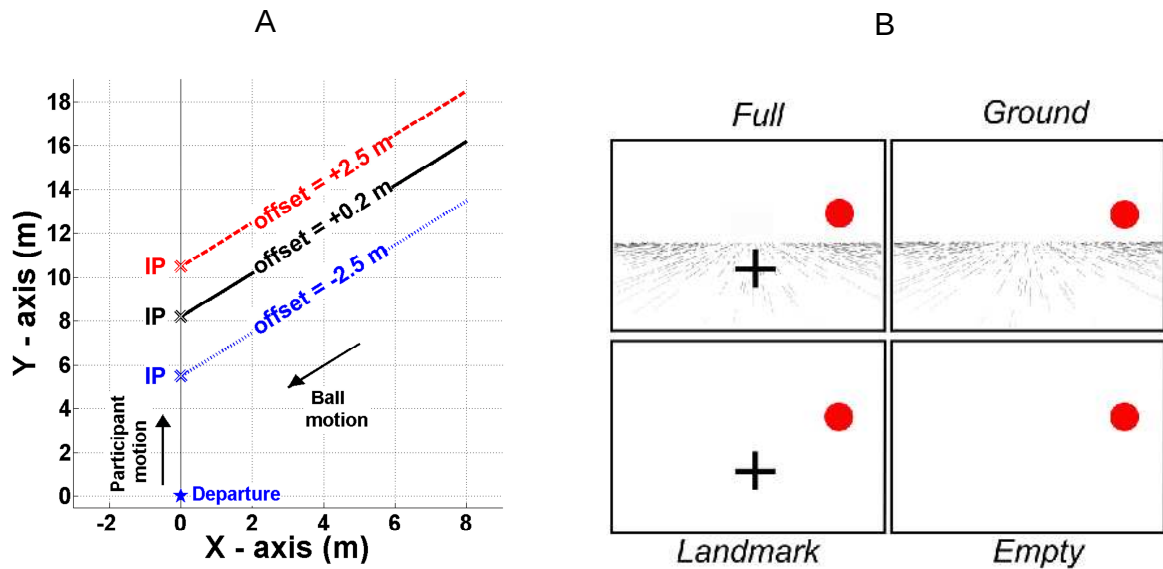


Figure 57 : (A) Top view of the ball trajectory and ball arrival position (i.e. interception points *IP*), participant departure and direction of displacement as a function of the three offset conditions (in dotted, plain and dashed lines for the -2.5, +0.2 and +2.5 m offset conditions, respectively). (B) Visual scene appearance in the four environment conditions (*Full*, *Ground*, *Empty* and *Landmark*). Screenshots are depicted with inversed colors.

Data analysis and dependent variables

The data were analyzed with regard to performance outcome, movement kinematics and perceptual-motor strategies involved.

Performance

Performance was computed in two different ways. The final Y-positions of participants along the Y-axis were cumulated and the percentages of trials displaying undershoots or overshoots of the interception point (IP) were computed. The absolute error (AE) was computed as the Euclidian distance between the centre of the head and the centre of the ball. Two different methods were used to compute participant to ball distances in AE: (1) at the moment at which the ball crossed the axis of displacement (i.e., 8 s after the ball appearance) or (2) at any moment during the trial.

Kinematics

The time series of individual velocity ($\dot{Y}$) profiles were averaged over intervals of 500 ms giving rise to 16 time intervals (see Bastin et al., 2006a, 2008; ; François et al., in press; Morice, Francois, Jacobs, & Montagne, 2010; Warren et al., 2001, for a similar methodology). Acceleration ($\ddot{Y}$) profiles were analyzed so as to identify the number of zero-crossings ($ZC_{\ddot{Y}}$). The number of zero crossings reflects the number of successive acceleration/deceleration cycles during the displacement and was used to determine the number for velocity regulation during a trial time course. For each acceleration profile (individual mean acceleration profiles for *Middle-Aged* Participants and trial acceleration profiles for the *Patient GL*), we picked out the number of zero crossings (from 1 to 5) during the trial time course and expressed it as a percentage of the total number of $ZC_{\ddot{Y}}$, so as to compare the two groups of participants.

Perceptual-motor strategy

Subsequent analyses compared the kinematics predicted by the CBA and by the ‘Bounded-CBA’ models (François et al., in press) with the observed kinematics computed by averaging individual displacement velocity profiles recorded for each group. Predicted kinematics were obtained as follow. The best-fitting set of parameters k_1 and k_2 (Equation 1) were first determined separately for each Offset, Environment, Group and model. Forty hundred combinations of parameter values were used (k_1 was varied from -0.95 to 0 in increments of 0.05 and k_2 from 0.0 to 0.95 in increments of 0.05). The initial mean position and speed of the participant and target were used as input variables. Numerical simulations were done on the complete trial duration (*i.e.*, 8 s). The goodness of the observed data’s fits provided by predicted kinematics were investigated through both the percentages of variance accounted for (R^2) and the Sum of Squares Error (SSE) between the predicted and observed curves. Predictions were thus obtained for each group, experimental condition and model. Secondly, the best set of k_1 and k_2 parameters, common for all offset conditions, but customized to each group, environment and model was determined separately by comparing the SSE between best predicted and observed kinematics.

Statistics

For each dependant variable, either individual mean values computed from *Middle-Aged* participants or trial values computed from the *Patient GL* were submitted to analyses of variance (ANOVA)²⁰.

Discrete variables (Absolute Error (AE) and Zero Crossings ($ZC_{\ddot{y}}$)) The effect of Environment conditions on AE and $ZC_{\ddot{y}}$ on *Middle-Aged* participants and the *Patient GL* were tested with separate one-ways ANOVAs (4 Environments) with repeated measures on the Environment conditions [Full, Ground, Landmark and Empty].

Kinematics

Separate three-ways ANOVAs with repeated measures on Environments [Full, Ground, Landmark and Empty], Offsets²¹ [-2.5, 0.2 and +2.5] and Time Intervals [16 intervals] conditions were performed on displacement velocity profiles for each group (*Middle-Aged*, *Patient GL*).

Comparing the Patient GL with Middle-Aged participants:

To compare the *Patient GL*'s data with those of *Middle-Aged* participants, the individual mean values obtained by the *Patient GL* in each dependent variable was converted to z-scores on the basis of mean and standard deviation of the *Middle-Aged* individual values. We considered that the *Patient GL*'s results differed significantly from those of *Middle-Aged* participants when her z-scores fell outside the 95% confidence intervals of the *Middle-Aged* participants for each dependent variable (AE, $ZC_{\ddot{y}}$ and velocity).

Post hoc comparisons were conducted using Newman-Keuls tests. The p value for statistical differences was set at 0.05.

²⁰ 10% of trials were excluded for each group. (AE>1.1 m for *Middle-Aged* participants and AE>1.8 m for the *Patient GL*). Remaining trials were all analysed.

²¹ As mentioned previously, the manipulation of the offset condition was introduced in order to favor the online control of the displacement velocity. As a consequence, no effect of the offset factor on performance was expected and this factor was not included from statistical analyses. Conversely, an effect on kinematics was expected and the factor offset was introduced in the analyses.

Predictions

The considered CBA strategy is based on the participant's ability to detect and cancel the rate of change of the bearing angle ($\dot{\theta}$). Perceiving $\dot{\theta}$ imply to rely on the combination of visual signals (to see the ball) and different sensory modalities (i.e., vision, proprioception) and different perceptual variables (i.e., FoE, Landmark) depending on the frame of reference used (i.e., allocentric, egocentric). Specific predictions about the way of perceiving $\dot{\theta}$ can thus be made depending on Environment manipulation and groups of participants.

Concerning the effect of Environment manipulations, in the *Empty* modality $\dot{\theta}$ could only be determined by using an egocentric frame of reference combining the visual position of the ball to extra-retinal signals (e.g., proprioception and oculomotor). This remains available in all Environment conditions. In the *Landmark* modality, $\dot{\theta}$ could only be determined by using an egocentric frame of reference combining the visual position of the ball to visual information of the body axis (e.g., the landmark) or to extra-retinal signals (e.g., proprioception and oculomotor). In the *Ground* modality, $\dot{\theta}$ could be determined by using an egocentric frame of reference combining the visual position of the ball to extra-retinal signals (e.g., proprioception and oculomotor) or by using an allocentric frame of reference combining the visual position of the ball to the visual position of the FoE. In the *Full* modality, all previously cited sensory signal and perceptual variables can be used to rely on the egocentric and allocentric frames of reference.

Concerning the effect of Group manipulation, the literature revealed that the different types of perceptual signals are redundant since they allow interceptive tasks to be performed whatever the perceptual content of the environment for healthy participants. The age-related decrease in performance of *Middle-aged* participants was described by Francois et al. (in press). We thus focus on the effect of deafferentation. The lost of somatosensory modalities should prevent the *Patient GL* to use proprioception to detect her direction of displacement. This allows us to predict an interaction between the Environment and the Groups. Indeed, in the *Empty* condition the *Patient GL* should not use proprioceptive information to rely on an egocentric frame of reference and would experience difficulties in intercepting the ball. Conversely, when visual signals are available (i.e., in the *Landmark*, *Ground* and *Full* conditions), the *Patient GL* should be able to use egocentric and allocentric frame of reference to reach a similar level as *Middle-Aged* participants. Finally given the impossibility for the *Patient GL* to track the ball angular position without using at least one of visual information

concerning its direction of displacement (i.e., FoE or Landmark), it's also reasonable to anticipate that the behavior produced by the Patient GL, should be jerkier than the behavior produced by Middle-Aged participants.

RESULTS

Performance

Absolute Errors

The panel A of the Figure 58 depicts the frequency distributions of participant's final Y-positions (i.e., participant's positions along the Y-axis at time $t=8$ s, when the ball crossed the participant's displacement axis) cumulated across trials and Environment conditions for the three offset conditions as compared to the position of the Interception Point (IP equal to 5.5, 8.2 and 10.5 m for the -2.5, +0.2 and +2.5 m Offset conditions). For all Offset conditions, the frequency distributions of *Middle-Aged* participant's final Y-positions presented Gaussian shapes and were spread up forward and backward the IP, whereas the *Patient GL* distributions of final Y-positions appeared flat and randomly binned forward and backward the IP. On average, distributions of final Y-positions show that *Middle-Aged* participants and the *Patient GL* similarly overshooted the IP (56.47 vs. 56.92 % of trial) in the three offset conditions (final Y-positions equal to 5.57, 8.24 and 10.51 m vs. 5.61, 8.39 and 10.57 m for *Middle-Aged* participants and the *Patient GL*, respectively)

The panel B of Figure 58 displays the absolute errors (AE) computed in two ways for the two groups (*Middle-Aged*, *Patient GL*) in the different Environment conditions (*Full*, *Ground*, *Landmark*, *Empty*). We first considered absolute errors as the Euclidian distance between the agent and the ball at the moment at which the ball crossed the participant's displacement axis (dotted bars). This criterion indicated that *Middle-Aged* participants and the *Patient GL* were not able to catch balls with proximal part of their body (e.g., with their head) as instructed but probably only with distal part (e.g., with their arms) (mean AE equal to 0.43 vs. 0.65 m). To control that *Middle-Aged* participants and the *Patient GL* succeeded in the task by overcoming the instructions and by only attempting to intercept balls at any moment of the trials, we also computed absolute error as the minimum Euclidian distance between the agent and the ball at any moment during the overall trial course (plain bars).

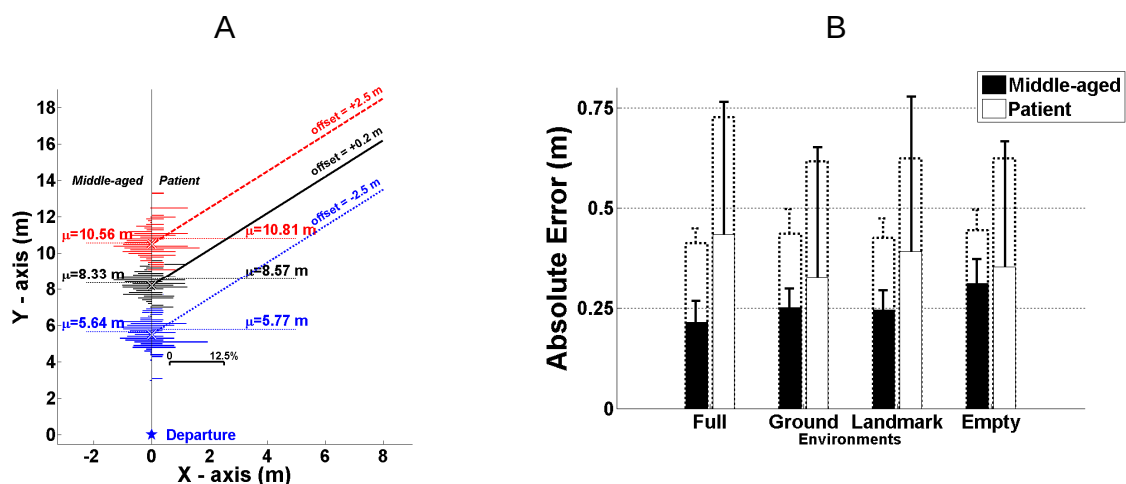


Figure 58 : (A) Frequency distribution of participant's final Y-positions (i.e., participant's positions along the Y-axis at time t=8 (s), when the ball crossed the participant's displacement axis) binned each 0.1 m and cumulated across trials performed in the four Environments conditions for the two groups of participants (Middle-Aged, Patient GL) and for the three offset conditions (-2.5, +0.2 and +2.5 m). The distributions of Middle-Aged participant's and the Patient GL's final Y-positions are depicted on the left and right sides of the displacement axis, respectively. The horizontal scale (from 0 to 12.5%) describes the frequency at which final Y-positions occurred for each bin. The average values of final Y-positions (μ) are reported and depicted with a dotted line. (B) Absolute Error plotted as a function of Environment conditions (Full, Ground, Landmark and Empty) for each Group (Middle-aged, Patient GL). Two computations of Absolute Error are displayed in B. The dotted bars depict the absolute error computed from the agent-ball distance at time t=8 (s). The plain bars represent the absolute error computed from the minimum of the agent-ball distance across the overall time-course of the trial. Vertical bars depict the standard deviation of mean values.

The Middle-Aged participants achieved an absolute error ranging from 0.21 to 0.31 m in the task (mean 0.25 ± 0.04 m). The one-way ANOVA repeated measures (4 Environments) performed on the AE mean values performed by *Middle-Aged* participants (computed with the latter definition) revealed a significant main effects of Environment ($F_{(3, 15)} = 4.83, p < .05$). Post-hoc analysis revealed that *Middle-Aged* participants were significantly more accurate in the *Full* and *Ground* environment than in the other environments ($0.21 \text{ m} \pm 0.05$, $0.25 \text{ m} \pm 0.05$, $0.25 \text{ m} \pm 0.05$ and $0.31 \text{ m} \pm 0.06$ m for the *Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty* conditions, respectively; $p < .05$).

The *Patient GL* displayed an average AE ranging from 0.33 to 0.49 m (mean 0.42 ± 0.07 m) depending on experimental conditions. A one-way ANOVA repeated measures (4 Environments) performed on the AE trial values did not reveal a significant main effect of environment ($F_{(3, 81)} = 0.81, p > .05$). The *Patient GL* performed the task with the same AE irrespective of the Environment condition. However, her AE fell outside the 95% confidence intervals computed from the *Middle-Aged* participants in the *Full*, *Landmark* and *Empty* conditions giving rise to larger AE for this *Patient GL* than for *Middle-Aged*

participants (*Full*: 0.71 vs. 0.35 m, *Landmark*: 0.60 vs. 0.43 m, *Empty*: 0.62 vs. 0.46 m). Conversely, the AE obtained by the *Patient GL* and *Middle-Aged* participants in the *Ground* condition were not significantly different (0.46 vs. 0.55 m).

Kinematics

Three-way repeated measures ANOVAs (4 Environments $\times$ 3 Offsets $\times$ 16 Time Intervals) on velocity profiles (Figure 59A) were performed separately for both groups of participants (*cf.*, Table 1).

Table 1 : Results of the three-ways ANOVA (4 Environments $\times$ 3 Offsets $\times$ 16 Time Intervals) performed on displacement velocity separately for each Groups of participants (Middle-Aged and Patient GL).

	Groups	
	<i>Middle-Aged</i>	<i>Patient GL</i>
<i>Offset</i>	$F_{(2, 10)} = 1986.46, p < .05^*$	$F_{(2, 18)} = 320.49, p < .05^*$
<i>Environment</i>	$F_{(3, 15)} = 4.25, p > .05$	$F_{(3, 27)} = 0.77, p > .05$
<i>Time</i>	$F_{(15, 75)} = 2.73, p < .05^*$	$F_{(15, 135)} = 34.39, p < .05^*$
<i>Offset $\times$ Time</i>	$F_{(30, 150)} = 4.62, p < .05^*$	$F_{(30, 270)} = 1.89, p < .05^*$
<i>Environment $\times$ Time</i>	$F_{(45, 225)} = 0.39, p > .05$	$F_{(45, 405)} = 2.56, p < .05^*$
<i>Offset $\times$ Environment $\times$ Time</i>	$F_{(90, 450)} = 0.42, p > .05$	$F_{(90, 810)} = 1.66, p < .05^*$

Middle-Aged participants. Analyses performed on individual mean velocity profiles revealed significant effects of Offset ($p < .05$) and Time Intervals ($p < .05$) but no significant main effect of Environment ($p > .05$). Moreover, Offset $\times$ Time Intervals ($p < .05$) interaction was also significant. *A posteriori* comparisons revealed that significantly different velocity profiles were produced in the three Offset conditions during the last 6 seconds of the trial ($p < .05$)(Figure 59). Once again the velocity changes were in accordance with the task requirements.

Patient GL. Analyses performed on trial mean velocity profiles revealed significant main effects of Offset ($p < .05$) and Time Intervals ($p < .05$). Moreover, the interactions Offset $\times$ Time Intervals ($p < .05$), Environment $\times$ Time Intervals ($p < .05$) and Offset $\times$ Environment $\times$ Time Intervals ($p < .05$) interactions were also significant. *A posteriori* comparisons revealed that the Patient GL exhibited a similar increase in velocity during the first two seconds whatever the Environment and Offset conditions ($p > .05$)(Figure 59). During the last 6

seconds, the displacement velocity profiles recorded in the *Empty* and *Landmark* conditions significantly differed between the three offset conditions ($p < .05$). Once again, the positive offset conditions gave rise to the higher overall velocity, the negative offset condition gave rise to the lower overall velocity, and intermediate offset conditions gave rise to intermediate velocity profiles ($p < .05$). Conversely, in the *Full* and the *Ground* environment conditions, the velocity profiles produced in the last 6 seconds were not significantly different ($p > .05$).

Taken together, these results show that the velocity profiles exhibited by *Middle-Aged* participants are highly affected by the Offset but only marginally by the Environment. Conversely the profiles produced by the *Patient GL* are affected differently by the Offset factor depending on the environment condition but greatly influenced by the Environment, with the jerkiest velocity profiles appearing in the *Full* condition. At a more descriptive level, it is also worth noting that the velocity adaptations produced by *Middle-Aged* participants were not smooth. In particular, the displacement velocity adjustments produced by the *Patient GL* are highly non linear in particular in the *Full* condition, i.e., when both optic flow and retinal signals are available.

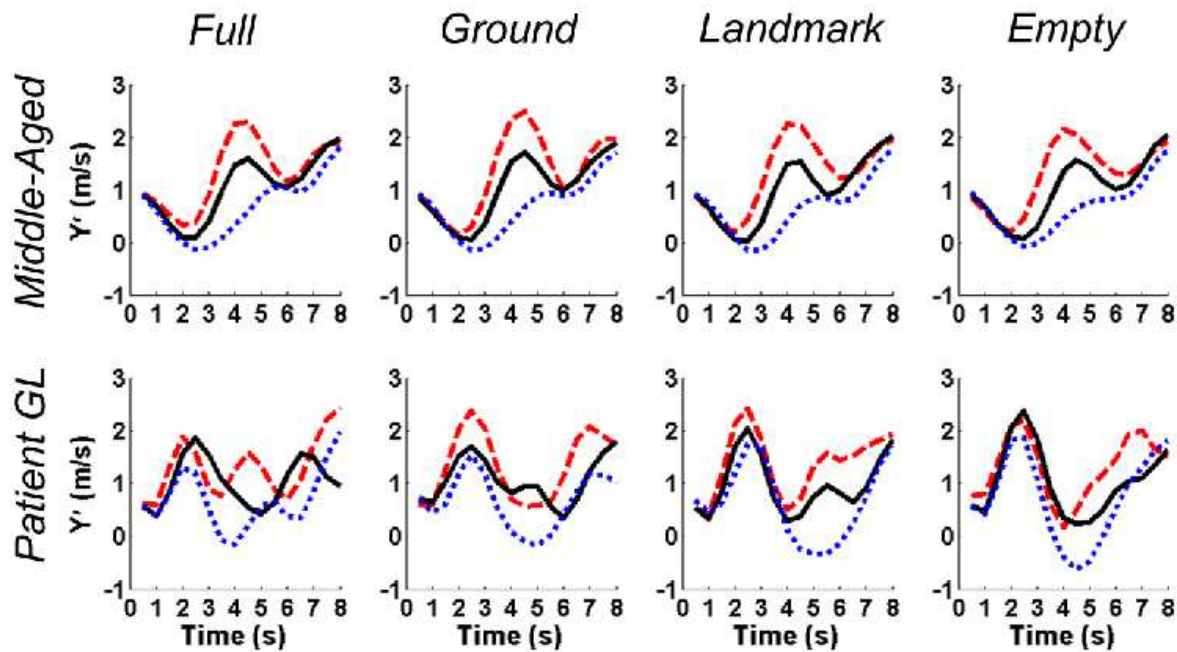


Figure 59 : Velocity profiles exhibited by the two groups of participants (*Middle-Aged* and *Patient GL*) in the four environment conditions (*Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty*) and in the three offset conditions (Dotted, plain and dashed lines for the -2.5, +0.2 and +2.5 m offset conditions, respectively).

We further analyzed the displacement kinematics by counting the number of zero crossings exhibited in the acceleration profiles ($ZC_{\ddot{y}}$). The number of $ZC_{\ddot{y}}$ is indicative of

whether the displacement adaptations are gradual (very few $ZC_{\ddot{y}}$) or conversely nonlinear (numerous $ZC_{\ddot{y}}$)(Figure 60).

One-way ANOVA (4 Environments) with repeated measures on the Environment factor performed on the individual mean number of $ZC_{\ddot{y}}$ performed by *Middle-Aged* participants dot not revealed a significant main effect of the Environment factor ($F_{(3, 15)} = 0.03, p > .05$). One-way ANOVA (4 Environments) with repeated measures on the Environment factor performed on the trial mean number of $ZC_{\ddot{y}}$ performed by the *Patient GL* dot revealed a significant main effect of the Environment factor ($F_{(3, 81)} = 2.18, p > .05$). Finally, the number of ZC produced by the *Patient GL* fell outside the 95% confidence interval computed from *Middle-Aged* participants in all the Environment conditions, giving rise to a larger trial mean value of ZC for the *Patient GL* than for *Middle-Aged* participants (3.70 ± 0.24 vs. 2.47 ± 0.07).

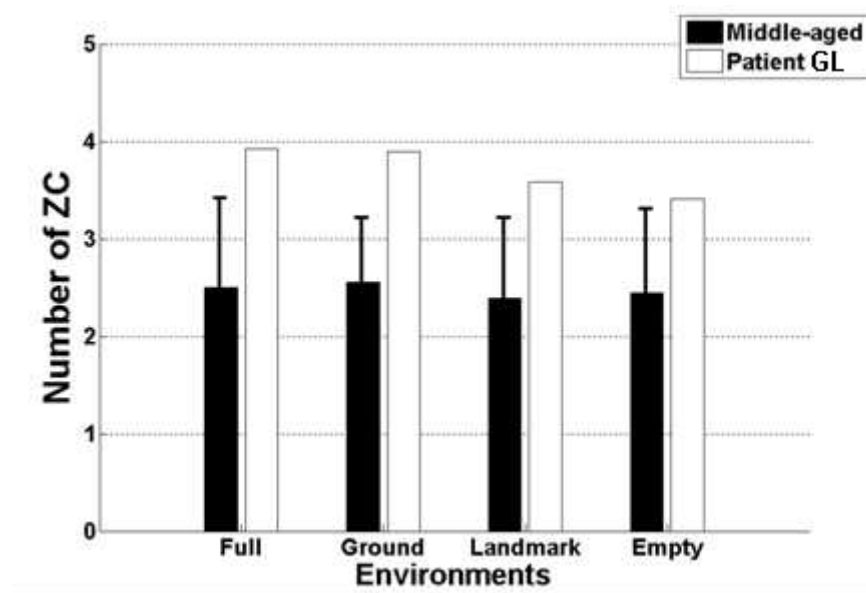


Figure 60: Number of zero crossings acceleration occurrence ($ZC_{\ddot{y}}$) plotted as a function of Environment conditions (Full, Ground, Landmark and Empty) for each Group (Middle-aged, Patient GL). Vertical bars depict the standard deviation of mean values.

Perceptual-motor strategy

First, analyses were based on systematic comparisons between the mean velocity profiles produced by each group of participants and the best fitting numerical simulations provided by the CBA model. Numerical simulations of the CBA model (dotted lines, Figure 61) failed to approximate the regulation behavior exhibited by both *Middle-Aged* ($R^2 < 0.46$) and the *Patient GL* ($R^2 < 0.52$) as found by Francois et al. (in press). In particular, it appears that the CBA model cannot account for their non-gradual velocity profiles (Figure 61).

Second, analyses were based on systematic comparisons between the mean velocity profiles produced by each group of participants and the best fitting numerical simulations provided by the ‘Bounded-CBA’ model (Equation 2) formulated by Francois et al. (in press). The ‘Bounded-CBA’ rests on a neuro-physiologically grounded control architecture. According to this model, a change in bearing angle gives rise to a behavioral adaptation provided the angular changes are greater than a threshold that is known to increase with ageing (Andersen & Enriquez, 2006; Tran, Silverman, Zimmerman, & Feldon, 1998; Warren, Blackwell, & Morris, 1989). Conversely, when angular changes do not exceed the threshold, the system maintains the previous state. More precisely in the ‘Bounded-CBA’ model, the ratio between the current value of the rate of change in bearing angle $\dot{\theta}$ and an assumed perceptual threshold $\dot{\theta}_t$ acts as a switch function. When the absolute value of the ratio $\dot{\theta}/\dot{\theta}_t$ exceeds 1, then the acceleration of the participant ($\ddot{Y}$) is driven by the rate of change in bearing angle and the damping of the system. If the absolute value of the ratio $\dot{\theta}/\dot{\theta}_t$ is less than 1, then the simulated acceleration ($\ddot{Y}$) continues to be gradually driven by the acceleration prescribed at $t - 1$.

$$\ddot{Y} = \begin{cases} k_1 \times \dot{\theta} \times \frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}} + k_2 \times \dot{Y}, & \text{if } |\dot{\theta}/\dot{\theta}_t| > 1 \\ \ddot{Y}_{t-1}, & \text{if } |\dot{\theta}/\dot{\theta}_t| < 1 \end{cases} \quad \text{Equation 2}$$

According to this architecture, for a given set of initial conditions, higher perceptual thresholds should give rise to jerky velocity changes, while low thresholds should give rise to smooth regulations. A best-fitting procedure identical to the one used for the CBA model was applied to the ‘Bounded-CBA’ model using a similar range of k_1 and k_2 parameters.

Moreover we also included a search on the perceptual threshold parameter ($\dot{\theta}_t$) ranging from 0°/s to 4°/s with 0.05°/s increments.

Figure 61 shows the best-fitting numerical simulations provided by the “Bounded-CBA” model (Equation 2) for each group of participants and for each Environment condition in the + 0.2m offset condition. The “Bounded-CBA” model provides a good account of the velocity profiles for the *Middle-Aged* participants and for the *Patient GL* and in the different environment conditions (R^2 mean values equal to 0.72 and 0.72). Interestingly, the best perceptual thresholds values accounting for the regulation behavior of *Middle-Aged* participants did not vary very much across the environment conditions ($2.3 < \dot{\theta}_t < 2.5$ °/s). Conversely, the environment conditions influenced the perceptual threshold for the *Patient GL*. While the perceptual thresholds were comparable for the *Patient GL* and the *Middle-Aged* participants in the *Full* condition (2.3 vs. 2.5°/s), the impoverishment of the environment was accompanied by an increase in the perceptual threshold (e.g., 2.3, 2.4, and 2.7 °/s in the *Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty* conditions, respectively for the +0.2 offset condition).

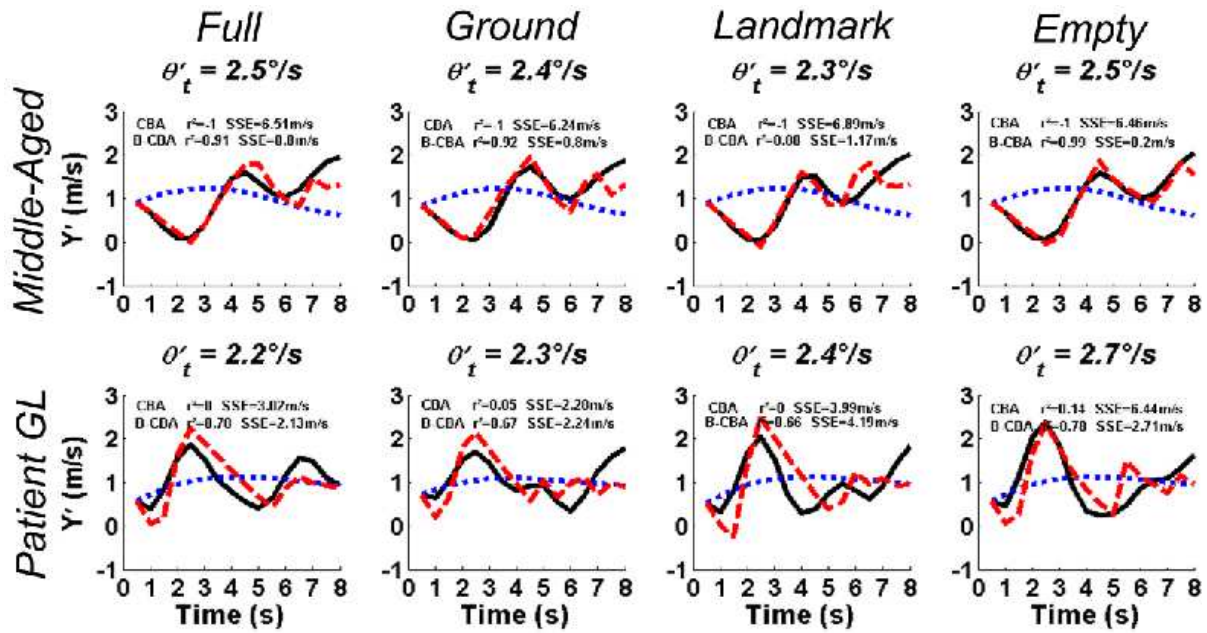


Figure 61: Best fitting numerical simulations of the average observed velocity provided by the two models (dotted and dashed lines for the CBA and ‘Bounded-CBA’ numerical simulations, respectively) for the two Groups of participants (Middle-Aged, Patient GL) in the different Environment conditions (*Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty*) for the +0.2 m offset condition. The R^2 and Sum of Square Error (SSE) corresponding to each model are included, together with the perceptual threshold providing the best fit ($\dot{\theta}_t$).

DISCUSSION

The aim of the Experiment was to determine to what extent deafferentation affected the human ability to intercept moving balls depending on visual sources of information contained in the environment. We asked two groups of participants (*Middle-Aged*, *Patient GL*) to intercept balls that travelled toward them obliquely in a virtual environment by manipulating a joystick allowing them to control their velocity. More precisely, we set-out an experiment in which different visual information specifying the direction of displacement were drained from the visual environment, leading finally participants to rely on proprioceptive information. In the *Full* Environment, the visual scene contained two visual information related to the direction of displacement: the FoE and a visual egocentric frame of reference. In the *Ground* Environment, only the FoE was available. In the *Landmark* Environment, only a visual egocentric frame of reference was available. In the *Empty* environment, the visual scene do not allowed to determine one's the direction of displacement on the basis of visual signals.

Analyses of performance (AE) revealed that the *Patient GL* achieved worse score than her healthy counterparts (*Middle-Aged* Participants). Moreover, whereas the performances of Middle-aged participants were damaged as the environment was drained from its visual content (*Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty*), the *Patient GL* was able to keep constant its performances in all Environments. *Middle-Aged* Participants produced a better AE than the *Patient GL* in three of the four environment conditions (i.e., *Full*, *Landmark* and *Empty* conditions). Kinematics analyses showed that the *Patient GL* exhibited jerkier velocity profiles than *Middle-Aged* participants. Moreover, whereas the velocity profiles performed by *Middle-Aged* participants do not differed between Environment conditions, the *Patient GL* exhibited jerkier velocity profiles in particular when the three types of perceptual signals (i.e., visual allocentric, visual egocentric, proprioceptive egocentric) were available (*Full* condition). The CBA model failed to explain the behavior observed by the *Middle-Aged* participant and the *Patient GL*. Interestingly however, adding adjusted perceptual thresholds in the numerical simulations allowed the 'Bounded-CBA' model to provide a good account of the behavior produced by the three groups of participants in all environment conditions.

The influence of deafferentation

The core issue of the present work is the evaluation of the interceptive performance when the egocentric reference system is greater impaired by the absence of proprioceptive signals. The three levels of analysis (Performance, Kinematics and Perceptual-Motor strategy) provide complementary pieces of answer. First of all, in comparison with *Middle-Aged* participants the *Patient GL* produced a lower performance in three out of the four environment conditions (*Full*, *Landmark* and *Empty*). While this result was expected in the *Empty* condition, we expected the *Patient GL* to be as accurate as *Middle-Aged* participants in the presence of visual information, i.e., in the other three conditions. Moreover, contrary to our expectations, the *Patient GL* reached the same level of performance when visual information was lacking (i.e., *Empty* condition) and when the environment was visually enriched.

The kinematic analyses performed on displacement kinematics provide some insights into these unexpected results. These analyses confirm previous studies; the displacement velocity profiles produced by both *Middle-Aged* and Deafferented patients are highly jerky (Riviere & Thakor, 1996). These jerky velocity profiles are even more pronounced for the *Patient GL*, in particular in the *Full* condition, i.e., when visual information is available through both optic flow and retinal signals.

Finally, the analyses on the perceptual-motor strategies enable us to clarifying the picture one step further. The initial version of the Constant Bearing Angle model failed to account for the regulation behavior produced by the *Patient GL*. Conversely, this study confirms the need for neuro-physiologically grounded architecture of law of control. As found by Francois et al. (in press), the ‘Bounded-CBA’ model allowed accounting for jerky velocity profiles performed by *Middle-Aged* participants, revealing thus that perceptual threshold for perceiving $\dot{\theta}$ drove the control of displacement. Moreover, our study also revealed that the ‘Bounded-CBA’ model allowed accounting for velocity profiles performed by the *Patient GL*. Consequently, the sudden and steep slope in the displacement adaptations could express the patient’s difficulties to detect small angular changes. This could have led her to ‘bounce’ from the upper part of the threshold to the lower part of the threshold. Interestingly the perceptual thresholds found for the *Patient GL* differed across the environment conditions (2.3, 2.6, 2.8 and 2.8 °/s for the *Full*, *Ground*, *Landmark* and *Empty* conditions respectively). In the *Full* condition, the patient’s threshold is not only minimal, but is also of the same magnitude as the threshold found for *Middle-Aged* participants. This result suggests that, when available, optic

flow and retinal signals compensate for the lack of extra-retinal signals in detecting the rate of change in bearing angle. The reason why this condition did not give rise to an increase in performance is probably related to the constraints imposed to the participant and in particular to the impossibility to see both the hand and the joystick.

Surprisingly the *Patient GL*'s performance did not decrease when both optic flow and retinal (i.e. the body-centered cross on the screen) information were removed. This result was unexpected given that the *Patient GL* suffers from a lack of proprioception from the neck muscles and that this information greatly contributes to determine object position and motion relative to the body (Biguer, Donaldson, Hein, & Jeannerod, 1988; Taylor & McCloskey, 1991). Although head position and muscular activity were not recorded in the present experiment, we could clearly notice that the *Patient GL* kept her head directed towards the ball, possibly by stiffening of her trunk and neck muscles. Freezing body segments is a common strategy of patients and *Middle-Aged* individuals with sensory impairments (Benjuya, Melzer, & Kaplanski, 2004; Bloem, Allum, Carpenter, Verschuur, & Honegger, 2002; Lajoie et al., 1992). Having both the head and gaze directed towards the ball, the *Patient GL* may have compensated perceptible changes in gaze direction (i.e., in bearing angle) by accelerating or decelerating accordingly. Within this framework, sensorimotor signals originating from the extra-ocular muscles (Gauthier, Nommay, & Vercher, 1990) would have an important role to detect the rate of change in the bearing angle. Relying essentially on these signals, the *Patient GL* would be able to perform the task with a reasonable accuracy in comparison with the other environment conditions.

CONCLUSION

This study confirms the need for neuro-physiologically grounded architecture of law of control but do not jeopardize the status of the Constant Bearing Angle strategy as a perceptual-motor principle being able to account for the regulation behavior of participants. More precisely, perceptual constraints added in numerical simulations of the 'Bounded-CBA' model perfectly fit with the 'perception actuation' level of analysis suggested by Bootsma (Bootsma, 1998). This study also reveals the perceptual problem encountered by Deafferented patients, whose perceptual systems allow them to be able to exploit redundant visual perceptual variables and switch from visual allocentric variables to egocentric ones. However, this study revealed the importance of proprioceptive signal for the control of interception in impoverished visual environments, providing thus converging results with previous study (Bastin et al., 2006a).

DISCUSSION GENERALE

Ce travail de thèse avait pour but de tester la robustesse de la loi de contrôle consistant à moduler l'accélération afin d'annuler les changements d'angle de relèvement (CBA). Cinq expériences nous ont permis d'explorer les limites d'application de cette loi de contrôle. Nous avons choisi de manipuler essentiellement (i) le support informationnel disponible durant la réalisation de la tâche (ii) et les caractéristiques des agents.

PRINCIPAUX RESULTATS OBTENUS

En manipulant le contexte informationnel, le premier chapitre expérimental (Chapitre 2) nous a permis de montrer que les agents modulent la façon dont ils contrôlent leur action d'interception en fonction de celui-ci. Lors de la première expérience (Chapitre 2, partie 1), pour un même point de départ et d'arrivée d'une balle, nous avons proposé différentes trajectoires (i.e., rectiligne ou courbée) qui étaient matérialisées ou non selon les essais. Quelle que soit la condition de matérialisation de la trajectoire, la loi de contrôle CBA prédit des déplacements locomoteurs différents selon les courbures de trajectoire de balle. En revanche, les conditions de matérialisation de la trajectoire, donnant accès au point d'interception, se prêtaient plus à la mise en œuvre d'une seconde loi de contrôle : la loi de contrôle MRV (i.e., reformulation du modèle Vitesse Requise) qui prend en compte le point d'interception et le temps de pré-contact pour accéder à la vitesse requise. Contrairement à la loi de contrôle CBA, celle-ci prédit des déplacements locomoteurs similaires quelles que soient les courbures. Les résultats montrent que selon le contexte informationnel les participants mettent en œuvre des lois de contrôle différentes. Plus particulièrement, ils utilisent la loi de contrôle CBA dans un environnement appauvri, tandis qu'ils mettent en œuvre la loi de contrôle MRV lorsque l'environnement est enrichi.

Cependant, si nos conditions de courbures ont permis de manipuler l'information de la loi de contrôle CBA, aucune condition expérimentale n'a été proposée afin de manipuler précisément une composante de l'information de la loi de contrôle MRV (i.e., la vitesse de déplacement requise ou la vitesse de déplacement courante). Nous avons opté pour une dé-corrélation de la vitesse de déplacement courante. Au cours d'une deuxième expérience (Chapitre 2, partie 2.1), nous avons voulu au préalable identifier quels étaient les invariants optiques utilisés par les participants pour contrôler leur vitesse de déplacement. Nous avons pour cela manipulé la hauteur des yeux et la densité de la texture afin de manipuler

respectivement les invariants optiques GOFR et ER,, et dé-corréler ainsi la vitesse optique de déplacement. Les résultats montrent que les deux invariants optiques manipulés induisent des régulations cinématiques spécifiques. Ceci permet de confirmer que les participants se basent sur GOFR et ER pour accéder à leur vitesse de déplacement.

Nous avons ensuite repris les manipulations expérimentales décrites ci-dessus dans une tâche d'interception au cours d'une troisième expérience (Chapitre 2, partie 2.2). Le but de cette expérience était de connaître la manière avec laquelle les participants contrôlaient leur action alors que le support informationnel des deux lois de contrôle (CBA et MRV) était dé-corrélé. Les résultats obtenus montrent que lorsque des variables informationnelles prédictives robustes (i.e., la trajectoire et le lieu d'interception) sont présentes dans l'environnement, la performance des participants est améliorée et les régulations motrices sont différentes de celles produites dans un environnement appauvri. Les résultats révèlent également que dans l'environnement riche, la manipulation de GOFR affecte la vitesse de déplacement produite par les participants, ce qui va dans le sens des prédictions faites à partir de l'utilisation de la vitesse requise. Toutefois ces effets se limitent à la première partie de l'essai et d'autres mécanismes de contrôle semblent prendre le relais dans un deuxième temps.

Dans le deuxième chapitre expérimental (Chapitre 3), nous avons demandé à une patiente dé-afférentée ainsi qu'à des populations de femmes jeunes et seniors de réaliser des interceptions dans des environnements plus ou moins enrichis. Ces expériences nous ont permis de montrer que pour une même tâche d'interception, les régulations comportementales produites dépendent des populations d'agents. Les résultats révèlent que l'âge et le déficit proprioceptif s'accompagnent d'une diminution de la performance. Les résultats ont également montré que les profils de vitesse produits étaient différents selon les catégories d'agents. Plus particulièrement, alors que les jeunes produisent des profils cinématiques lisses et linéaires, les profils de vitesse produits par les seniors sont non-linéaires et plus abrupts. Cette non-linéarité des profils de vitesse est encore plus accentuée chez la patiente dé-afférentée. Enfin, les résultats montrent que la loi de contrôle CBA ne permet pas de rendre compte du comportement d'interception produit par une population senior et une patiente dé-afférentée. En revanche, en intégrant dans la loi de contrôle CBA les particularités neurophysiologiques (sous forme de seuils perceptifs) des populations testées, notre modèle permet de rendre compte du comportement produit par les trois populations d'agents.

Selon nous, les résultats obtenus dans le cadre de ce travail de thèse illustrent tout d'abord la flexibilité des mécanismes perceptivo-moteurs sous-jacents. Nous montrerons que cette flexibilité transparaît selon trois niveaux distincts. Ce travail de thèse permet également de soulever les limites des lois de contrôle. Dans une deuxième partie, nous montrerons donc les limites de la loi de contrôle testée et nous verrons en quoi la proposition de notre modèle permet de répondre en partie à ces limites. Nous situerons ensuite notre modèle par rapport aux différents niveaux d'analyse des mécanismes de contrôle perceptivo-moteur.

1. Flexibilité des mécanismes perceptivo-moteurs

Dans cette partie nous parlerons de flexibilité perceptivo-motrice de différentes manières. Nous nous intéresserons tout d'abord aux différents modes d'accès à l'information. Puis nous mettrons en évidence que cette flexibilité se retrouve également au niveau informationnel. Pour finir nous montrerons que cette flexibilité transparait également au niveau des lois de contrôle.

1.1. Complémentarité des différents modes d'accès à l'information

Différents corrélats sensoriels permettent à un agent d'accéder à une même information de différentes manières (e.g., Bastin & Montagne, 2005 ; Bastin et al., 2006a). Dans le cadre des différentes expériences décrites dans le Chapitre 3, nous nous sommes intéressés à différents modes d'accès au taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$). Nous avons différencié trois modes d'accès distincts faisant appel à deux corrélats sensoriels différents (proprioception et vision). L'agent pouvait ainsi accéder à l'angle de relèvement en référant la position de la balle à son axe corporel médian sur la base de tensions musculaires (mode d'accès proprioceptif) ou de repère(s) visuel(s) constituant le prolongement de cet axe médian (mode d'accès visuel). Enfin, l'agent pouvait également référer la balle à la direction de son déplacement spécifié par le Focus d'Expansion Optique (mode d'accès optique). La disponibilité de ces modes d'accès était manipulée en proposant différents types d'environnement ainsi que différentes populations d'agents (jeunes, seniors et une patiente dé-afférentée). Dans l'ensemble, nos résultats révèlent que les agents, quels qu'ils soient, sont en mesure d'utiliser les différents modes d'accès proposés (proprioceptif, optique et visuel) pour détecter $\dot{\theta}$ et contrôler efficacement leur action. Nous allons maintenant nous intéresser successivement aux différents agents en commençant par les jeunes.

Les résultats obtenus confirment ceux d'autres études qui avaient déjà montré que sur la base du mode d'accès proprioceptif, les jeunes produisent le même niveau de performance que dans des conditions plus riches (Bastin et al., 2006a; Bastin & Montagne, 2005). Ces résultats sont corroborés dans notre expérience par l'identification d'un seuil de détection de l'information identique dans tous les environnements. La production d'une performance

maximale, indépendamment des modes d'accès disponibles, révèle un effet de plafond qui pourrait traduire une difficulté insuffisante de la tâche. En revanche, ces résultats suggèrent également une flexibilité du système perceptivo-moteur puisque les participants sont en mesure de passer de l'utilisation d'un à plusieurs modes d'accès (et *vice versa*), tout en conservant un niveau de performance maximal. Ces résultats sont comparables avec ceux obtenus par Bastin et Montagne (2005).

Si l'on s'intéresse maintenant plus en détail aux autres agents, nos résultats dévoilent une dégradation de la performance avec l'âge, quelle que soit la richesse de l'environnement. Nos résultats rejoignent ceux obtenus dans de précédentes études qui montrent une dégradation générale de la performance avec l'âge (Spirduso & McRae, 1990 ; Voelcker-Rehage, 2008). Cette dégradation de la performance peut également s'expliquer par une plus grande difficulté des séniors à détecter l'information (i.e., $\dot{\theta}$) pour contrôler leur action. Les seuils perceptifs que nous avons trouvés dans notre expérience confirment cette hypothèse puisqu'ils évoluent de 1°/s pour les jeunes à environ 3°/s pour les séniors. Ceci va dans le sens d'études qui ont montré qu'une altération de la perception de la direction et de la vitesse des mouvements accompagne le vieillissement (Andersen & Enriquez, 2006; Warren, Blackwell, & Morris, 1989). En revanche, nos résultats montrent que contrairement aux jeunes et à la patiente dé-afférentée, la richesse de l'environnement (i.e., l'ajout des modes d'accès visuel et optique) améliore la performance des séniors. Ceci met en évidence la capacité du système perceptivo-moteur à utiliser conjointement plusieurs modes d'accès pour détecter l'information. Cette amélioration de performance des séniors peut s'expliquer par une dépendance plus forte de cette population au corrélât sensoriel visuel afin de compenser une altération générale du système proprioceptif, comme cela a déjà été mis en évidence dans une tâche locomotrice (Mulder, Zijlstra, & Geurts, 2002; van Hedel & Dietz, 2004). Cette capacité à utiliser conjointement des modes d'accès visuel et optique dans notre étude confirme celle observée dans une tâche de marche réalisée par des jeunes dans des environnements de différentes richesses (Warren et al., 2001).

Compte tenu des difficultés généralement rencontrées par la patiente dé-afférentée dans des environnements visuellement appauvris, nous pensions qu'une structuration de l'environnement devait avoir un effet bénéfique sur la performance. Pourtant nos résultats révèlent un niveau de performance équivalent dans tous les environnements testés. Ces résultats appellent deux commentaires. Tout d'abord, ils permettent d'apporter des preuves

supplémentaires de l'importance de la proprioception pour accéder au taux de changement de l'angle de relèvement (Bastin et al., 2006a). En effet, bien que la patiente dé-afférentée soit dépourvue de proprioception en dessous du nez, elle est en mesure de réussir correctement l'interception dans un environnement où seule la balle est affichée. Ces résultats montrent donc que les tensions musculaires des muscles extra-oculaires permettent de prélever $\dot{\theta}$ et de l'utiliser pour contrôler l'action d'interception. De plus, le niveau comparable de performance produit par la patiente dé-afférentée dans les différents environnements est surprenant et en contradiction avec des études qui ont démontré chez cette même patiente, l'importance de la vision dans le contrôle de l'action dans différentes tâches (Blouin et al., 1993 ; Cole & Paillard, 1995 ; Fleury et al., 1995; Lajoie et al., 1992). Un début d'explication à ces résultats se trouve dans les seuils perceptifs que nous avons obtenus. En effet, à mesure que l'environnement permet d'utiliser d'autres modes d'accès que le mode proprioceptif, les seuils perceptifs de la patiente diminuent (de 3°/s à 2.4 °/s). L'enrichissement de l'environnement permet donc à la patiente dé-afférentée une détection plus précise du taux de changement de l'angle de relèvement. Cependant, cette détection plus précise de l'information nécessite en retour un contrôle plus fin de l'action. Or, en raison de l'absence de proprioception aggravée par le port de lunettes masquant sa main, la patiente dé-afférentée serait dans l'incapacité de produire un tel niveau de précision de l'action. Ainsi, elle n'arriverait plus à faire correspondre de manière efficace son action motrice avec la variation du taux de changement de l'angle perçue.

1.2. La complémentarité des informations

Si les agents ont à leur disposition plusieurs modes d'accès leur permettant de prélever la même information dans différents environnements, ils peuvent également utiliser plusieurs informations pour accéder à l'état courant de la relation Agent-Environnement. Dans la partie 2.1 du Chapitre 2, nous avons voulu nous intéresser spécifiquement aux informations optiques qui étaient utilisées pour contrôler la vitesse de marche en dé-corrélant la vitesse de déplacement optique. Les résultats de la manipulation de GOF et ER montrent que quelle que soit l'information optique manipulée, les participants modifient leur vitesse de déplacement dans le sens des prédictions. Ceci confirme les résultats d'autres études ayant montré que la manipulation du flux optique induit une modification de la vitesse préférentielle de marche (Pailhous et al., 1990; Prokop, Schubert, & Berger, 1997 ; De Smet, Malcolm,

Lenoir, Segers, & De Clercq, 2009). Notre étude permet cependant d'aller plus loin en démontrant l'utilisation d'invariants optiques (GOFR et ER) dans le contrôle de la vitesse de déplacement avec un poids plus important accordé à GOFR. Ces résultats semblent montrer qu'il existe une dominance d'une information sur l'autre. Cependant cette dominance n'est pas absolue et semble dépendre de l'action à réaliser et de la nature de la tâche (Ballard, Roach, & Dyre, 1998 ; Dyre, 1997 ; Fajen, 2005b ; Larish & Flach, 1990). Tout en amenant des preuves supplémentaires quant à l'utilisation de ces informations dans une tâche de locomotion, nos résultats ne permettent pas de trancher formellement sur la dominance d'une information sur l'autre. Il serait d'ailleurs plus logique de penser que ces informations sont utilisées conjointement et que l'environnement déterminerait l'utilisation par les agents d'une information plutôt qu'une autre. Par exemple, on peut penser qu'un conducteur roulant sur une autoroute de jour serait plus à même d'utiliser GOFR. En revanche, GOFR n'étant plus disponible la nuit, on peut penser qu'il utilisera alors ER (accessible à partir du défilement des lignes de marquage par exemple). Cet exemple illustre l'intérêt de la complémentarité des informations. Ainsi, grâce à la capacité du système perceptivo-moteur à utiliser différentes informations, un agent peut faire face aux changements des contraintes environnementales.

Si certaines études montrent que la vitesse de locomotion résulte principalement de contraintes biomécaniques ou de la perception d'informations proprioceptives (Ivanenko, Grasso, & Lacquaniti, 2000 ; Kugler & Turvey, 1987), nos résultats montrent que des informations visuelles sont également utilisées dans le contrôle de la vitesse de locomotion. Nos résultats montrent également que les effets que nous observons sur les régulations motrices ne correspondent pas à la totalité des effets attendus par la manipulation de GOFR et ER. Ces résultats plaident en faveur d'une utilisation simultanée des informations visuelles, proprioceptives et des contraintes biomécaniques. Cette prise en compte conjointe des différentes informations serait responsable de la différence entre les effets attendus et les effets observés. Toutefois, d'un point de vue plus général, nos résultats rejoignent ceux de différentes études qui montrent un rôle important des informations visuelles dans le contrôle perceptivo-moteur (Bardy & Laurent, 1998 ; Lee & Aronson, 1974 ; Rieser et al., 1995 ; de Oliveira, Huys, Oudejans, van de Langenberg, & Beek, 2007).

1.3. Flexibilité et lois de contrôle

Dans les expériences des parties 1 et 2.2 du Chapitre 2, nous avons aménagé l'environnement de telle sorte que différentes lois de contrôle pouvaient être mises en œuvre pour contrôler l'action d'interception. Les participants pouvaient ainsi opter pour la mise en œuvre de la loi de contrôle CBA prenant en compte le taux de changement de l'angle de relèvement. Ils pouvaient également choisir de prendre en compte des variables informationnelles prédictives comme le point d'interception et mettre en œuvre la loi de contrôle MRV (i.e., la loi de contrôle Vitesse Requise modifiée). Nos résultats montrent tout d'abord que lorsque l'environnement est appauvri les participants utilisent la loi de contrôle CBA. Ces résultats confirment ceux obtenus dans de nombreuses études antérieures (Bastin et al., 2006b; Chardenon et al., 2005; Lenoir et al., 1999a; Lenoir et al., 2002). Cependant, notre étude montre qu'en présence d'un environnement riche les participants optent pour la mise en œuvre de la loi de contrôle MRV. Le contexte informationnel modifie donc la façon de contrôler l'action d'interception. Les mécanismes perceptivo-moteurs sous-tendant ce contrôle sont suffisamment flexibles pour permettre à l'agent de passer de l'utilisation d'une loi purement prospective dans un environnement pauvre à l'utilisation d'une loi de contrôle hybride dans un environnement riche qui intègre des informations de nature prédictive.

Même si nos résultats démontrent clairement l'utilisation de variables prédictives en dépit d'une information prospective (i.e., le taux de changement de l'angle de relèvement), ils ne vont pas à l'encontre de la mise en œuvre d'un principe de contrôle prospectif de l'action (Bastin et al., 2006a, 2006b, 2008; Lenoir et al., 1999a). Nos résultats révèlent d'ailleurs que le comportement produit par les participants est parfaitement ajusté par la loi de contrôle MRV qui prédit un contrôle prospectif sur la base de variables prédictives. Il est d'ailleurs logique de penser que si les lois de contrôle sont complémentaires au regard de la tâche à accomplir, les agents choisiront la loi de contrôle leur permettant un comportement mieux adapté et plus efficient. Ainsi, lorsque la trajectoire est matérialisée, parce que la loi de contrôle CBA l'amène à réaliser des régulations inutiles (e.g., décélération puis accélération pour une courbure négative), l'agent préférera utiliser la loi de contrôle MRV qui repose sur des variables informationnelles prédictives (i.e., la courbure de trajectoire et le point d'interception). Ces résultats confortent ceux obtenus par Lenoir et al. (2005) dans une tâche de réception au volley-ball dans laquelle les auteurs imprimaient (ou non) aux ballons une

rotation entraînant ainsi des trajectoires curvilignes (ou rectilignes). Les auteurs positionnaient les joueurs au futur lieu de réception, si bien qu'aucun déplacement n'était nécessaire pour réussir la réception²². Les auteurs proposaient différents patrons de textures de ballon permettant l'accès ou non à des variables informationnelles prédictives (i.e., l'effet imprimé aux ballons et par conséquent la trajectoire suivie). Les résultats obtenus montrent que les joueurs se déplacent latéralement lorsque la trajectoire de la balle est curviligne, même s'ils sont placés initialement au lieu d'arrivée. Les résultats dévoilent également qu'à mesure que la texture du ballon est accentuée (i.e., plus de variables prédictives) les déplacements latéraux diminuent. Bien que le comportement n'ait pas été ajusté par une loi de contrôle, ces résultats plaident en faveur de la mise en œuvre d'une loi de contrôle prospective utilisant conjointement des variables informationnelles prédictives. Ces résultats sont du même type que ceux observés lorsque nous matérialisons la trajectoire des balles. Ainsi, l'ajout de variables informationnelles prédictives amène les agents à sélectionner une loi de contrôle hybride du même style que notre loi de contrôle MRV.

Tous ces résultats révèlent une certaine flexibilité des mécanismes perceptivo-moteurs sous-jacents. Cette flexibilité permet à l'agent selon le contexte informationnel de changer de loi de contrôle si nécessaire. Cette facilité de changement de mode de contrôle selon les conditions environnementales a par exemple été mise en évidence par Mazyn, Savelsbergh, Montagne et Lenoir (2007) dans une tâche de capture de balle. En masquant la balle en cours d'essai, les auteurs mettent en évidence l'utilisation de modes de contrôle de l'action différents (prédictif ou bien prospectif) selon les contraintes environnementales rencontrées.

Afin de pousser plus loin la démonstration de cette flexibilité des lois de contrôle, nous avons décidé de dé-corréler les deux lois de contrôle en même temps. Dans l'expérience du Chapitre 2, partie 2.2, nous avons donc dé-corrélé la loi de contrôle MRV en manipulant la vitesse de déplacement courante. Dans le même temps, nous avons dé-corrélé la loi de contrôle CBA en reprenant la manipulation des courbures décrite précédemment. Les résultats que nous avons obtenus vont dans le sens d'une capacité à changer de mode de contrôle de l'action selon les contraintes environnementales. En utilisant la loi de contrôle MRV tout au

²² Lenoir et al. (2005) ont également introduit des trajectoires dont le lieu d'arrivée était différent de la position initiale des joueurs. Ces trajectoires servaient de « leurres » afin d'encourager la production de régulations comportementales.

long de l'essai, les participants devraient échouer systématiquement. Or les résultats révèlent dans l'environnement favorisant la mise en œuvre de cette loi de contrôle que les profils de vitesse produits correspondent aux prédictions de la loi de contrôle MRV durant la moitié de l'essai. Ceci suggère à nouveau la mise en œuvre dans l'environnement riche de cette loi de contrôle MRV. Pourtant, les résultats montrent également que les participants produisent une performance de meilleure qualité que dans l'environnement appauvri. Cette amélioration de la performance dans un environnement riche pourrait alors s'expliquer par un changement de loi de contrôle. La flexibilité du système perceptivo-moteur permettant un transfert de mode de contrôle, les participants seraient alors passés d'une loi de contrôle MRV vers une loi de contrôle CBA (plus adaptée). Si nos résultats de la partie 1 du Chapitre 2 ont montré l'aptitude des participants à changer de loi de contrôle entre les essais, ces résultats semblent mettre en lumière la capacité des participants à changer également de lois de contrôle au cours d'un essai. Une explication à cette capacité à changer de loi de contrôle pendant un essai pourrait être trouvée dans la nature des régulations à produire et la mise en relation des deux lois de contrôle. En effet, une loi de contrôle permet aux agents de connaître la nature des régulations à produire pour réussir la tâche. Or, dans notre étude, l'utilisation de la loi de contrôle MRV entraîne des régulations motrices aboutissant à un échec de la tâche lorsque GOFR est manipulé. Si l'agent utilise cette loi de contrôle, alors il se crée un décalage entre le comportement induit par la loi de contrôle MRV et les contraintes de la tâche à réaliser. A un certain moment, l'importance de ce décalage serait telle (l'utilisation exclusive de la loi de contrôle MRV aurait conduit les participants à des erreurs finales de l'ordre de 80 cm) qu'elle mettrait en cause la mise en œuvre de la loi de contrôle. Cette perception de l'échec à venir peut être la raison pour laquelle l'agent changerait de loi de contrôle au cours de l'essai pour réussir la tâche.

Nos résultats révèlent une flexibilité perceptivo-motrice qui autorise les agents à changer de loi de contrôle aussi bien entre les essais qu'au sein d'un même essai. D'un point de vue plus général, on peut penser que c'est cette flexibilité existant entre les lois de contrôle qui permet aux joueurs de football américain (Figure 1) de réussir à intercepter le réceptionneur (n°87 de la Figure 1) dont les trajectoires sont difficilement prévisibles.

Une hypothèse alternative à l'utilisation de deux lois de contrôle distinctes selon le contexte informationnel peut également être envisagée. En effet, il convient de noter que nous avons choisi, pour étudier la flexibilité perceptivo-motrice des lois de contrôle, de présenter

un environnement pauvre (favorisant le modèle CBA) ou extrêmement riche (favorisant le modèle MRV). Nous avons donc pris l'option de tester deux lois de contrôle différentes. Cependant, une autre possibilité est d'envisager la prise en compte graduelle et combinée d'informations prospective et prédictive (Lenoir et al., 2005) au sein d'une même loi de contrôle. Au même titre que nos deux lois de contrôle, celle-ci nous aurait peut être également permis d'expliquer les comportements produits dans les deux environnements testés (appauvri et riche). De plus, en accordant un poids respectif aux deux modes de contrôle, cette loi de contrôle pourrait également expliquer le comportement produit dans des environnements dont la richesse serait manipulée de manière graduelle. En effet, dans une tâche de marche vers une cible, Warren et al. (2001) ont montré que selon le poids accordé aux informations, une même loi de contrôle a la capacité de rendre compte du comportement produit dans des environnements de richesse différente. Enfin, la solution au problème de la coexistence de mécanismes prospectifs et prédictifs peut se trouver dans un comportement de régulation intermédiaire. Récemment, dans une tâche d'interception, Diaz, Phillips et Fajen (2009) ont montré qu'une loi de contrôle CBA dont le fonctionnement consiste à modifier son comportement à un instant t afin de réduire les changements de l'angle de relèvement à l'instant ultérieur ($t+\Delta t$) est plus à même d'expliquer le comportement qu'une loi de contrôle CBA. Cette loi de contrôle intermédiaire a permis aux auteurs de montrer que les comportements des participants étaient produits afin d'annuler les changements de l'angle de relèvement avec une anticipation de 0.75s. L'expérience de Diaz et al. (2009) apporte ainsi des preuves quant à la possibilité d'utiliser conjointement un mode de contrôle prospectif et prédictif pour réguler son action à partir du taux de changement de l'angle de relèvement.

Tous ces résultats confirment la flexibilité du système perceptivo-moteur dans l'utilisation d'un ou plusieurs modes d'accès à une information pour contrôler une action d'interception. La complémentarité de ces modes d'accès (diminution des seuils perceptifs) permet à des populations d'agents jeunes et seniors de faire face à des contraintes environnementales importantes de manière efficace. Nos résultats permettent de mettre plus en avant cette flexibilité perceptivo-motrice, étant donné qu'un agent ayant perdu la quasi-totalité d'un mode d'accès à une information est en mesure de contrôler correctement son action. Enfin ils donnent la possibilité d'aller plus loin dans la démonstration de l'importance de la proprioception pour accéder au taux de changement de l'angle de relèvement puisqu'ils montrent que les signaux proprioceptifs des muscles extra-oculaires permettent également d'accéder au taux de changement de l'angle de relèvement. La flexibilité des mécanismes

perceptivo-moteurs transparait également à un niveau supérieur. En effet, nos résultats montrent qu'à partir de ces différents modes d'accès, les agents peuvent également utiliser plusieurs informations pour accéder à l'état courant de la relation Agent-Environnement. Enfin, cette flexibilité perceptivo-motrice se retrouve à un niveau plus général, puisque selon les contraintes environnementales, les agents peuvent changer de loi de contrôle. Ce changement peut s'opérer au cours d'un essai ou d'un essai sur l'autre en fonction des conditions d'exécution rencontrées. Les agents ont également la possibilité de combiner les deux modes de contrôle (prospectif et prédictif) pour répondre efficacement à des changements aléatoires de l'environnement.

2. Quelle place pour notre modèle “CBA-borné” ?

La deuxième option que nous avons choisie pour mettre à l'épreuve la loi de contrôle CBA était de tester sa capacité à rendre compte du comportement de différentes populations d'agents, présentant chacune des particularités neurophysiologiques.

2.1. Les limites du CBA

Les lois de contrôle présentent le grand intérêt de permettre une meilleure compréhension de l'intégration de l'information dans le contrôle prospectif de l'action, afin de produire des régulations fonctionnelles. De plus, dans une tâche considérée, ces lois de contrôle sont théoriquement en mesure d'expliquer le comportement produit par différents agents (Duchon et al., 2002). Dans les expériences du Chapitre 3 nous avons donc demandé à deux populations de femmes jeunes et seniors, ainsi qu'à une patiente dé-afférentée de réaliser une tâche d'interception dans des environnements plus ou moins riches. Les résultats obtenus montrent que les profils de vitesses produits sont différents selon les populations. Les jeunes produisent des profils de vitesse lisses et linéaires, tandis que les seniors produisent des profils de vitesse abrupts et non-linéaires. Cette non-linéarité est accentuée chez la patiente dé-afférentée. Les résultats montrent également que l'environnement n'a aucun effet sur les profils de vitesse, excepté pour la patiente dé-afférentée. Nous avons donc ajusté ces données avec la loi de contrôle CBA (cf., Equation 12 p. 49). Les simulations de la loi de contrôle s'ajustent parfaitement aux régulations produites par les jeunes et confirment les résultats

observés dans des études antérieures (Bastin et al., 2006a, 2006b; Bastin & Montagne, 2005) . En revanche, nos résultats montrent que ces profils simulés sont dans l'incapacité d'expliquer les régulations abruptes et non-linéaires produites par la population sénior et la patiente dé-afférentée.

On touche ici aux limites des lois de contrôle et plus particulièrement aux limites de la loi de contrôle CBA. En effet cette loi de contrôle consiste pour un agent à réguler son comportement afin de faire correspondre un état courant (i.e., le taux de changement de l'angle de relèvement courant) à un état idéal (i.e., un taux de changement de l'angle de relèvement nul). Pour pouvoir contrôler son action sur la base de cet état idéal, la loi de contrôle CBA prédit une modification du comportement dès qu'il se crée une différence (extrêmement minime) entre l'état idéal et l'état courant. Ceci sous-entend donc une détection immédiate et précise de l'information ainsi qu'une régulation motrice adéquate. Cependant, ce fonctionnement de la loi de contrôle CBA est limité puisqu'il ne prend pas en considération les capacités perceptives et/ou motrices des agents. En effet, il est possible que l'agent ne détecte pas l'information en deçà d'un seuil perceptif (pour des raisons neurophysiologiques par exemple). De la même manière, bien qu'il ait détecté l'information, l'agent peut selon ses capacités d'action réguler différemment son action. Par exemple, l'agent peut décider d'adopter un comportement prudent et d'annuler les changements de l'angle de relèvement immédiatement. A l'inverse, si l'agent possède une capacité d'accélération importante, il peut décider d'attendre avant d'accélérer et d'annuler les changements de l'angle de relèvement. Par exemple, dans une tâche d'interception dans laquelle les participants pouvaient moduler à la fois la vitesse et la direction de déplacement, Bastin, Fajen et Montagne (2010) ont montré que les vitesses de déplacement maximales des participants (contraintes expérimentalement) déterminent le contrôle de l'action mise en œuvre.

2.2. Le modèle « CBA-borné »

Ayant conscience des limites de la loi de contrôle CBA tant au niveau moteur que perceptif, nous avons donc choisi de la modifier. Toutefois, dans notre étude, même si les comportements non-linéaires et abrupts des participantes séniors et dé-afférentée peuvent théoriquement résulter des différences de capacité d'action, nous avons choisi d'écarter cette piste. En effet, toutes les participantes utilisaient un joystick dont les capacités

d'accélération/décélération sont toujours identiques, réduisant les segments moteurs utilisés. En revanche, il est fort possible que l'agent ne détecte pas l'information en deçà d'un seuil perceptif (pour des raisons neurophysiologiques) ce qui aurait pu entraîner un comportement différent. Des études ont par exemple montré qu'il existe des seuils de détection des informations (Lee, 1976 ; Warren et al., 1989) qui augmentent avec l'âge (Snowden & Kavanagh, 2006).

Pour répondre aux limites inhérentes à la loi de contrôle CBA, nous avons donc choisi de prendre en compte les limites perceptives des agents qui pourraient expliquer les comportements non-linéaires des participantes séniors et dé-afférentée. Nous avons pour cela introduit dans la loi de contrôle CBA des seuils perceptifs du taux de changement de l'angle de relèvement. Ainsi, c'est le rapport entre le taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$) et le seuil de détection de ce taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}_t$) qui déterminera les régulations comportementales produites (Equation 17). Ainsi, si $\dot{\theta}/\dot{\theta}_t$ est inférieur à 1 (i.e., le seuil est supérieur à $\dot{\theta}$ courant), les participants ne perçoivent pas l'information, ils sont dans une « zone de dérive » (partie du bas de l'équation 17) au cours de laquelle ils reproduisent le comportement courant (i.e., production de la même accélération). En revanche, dès lors que le ratio $\dot{\theta}/\dot{\theta}_t$ est supérieur à 1 (i.e., le seuil est inférieur à $\dot{\theta}$ courant), alors les participants perçoivent l'information (i.e., ils sortent de la « zone de dérive ») et ils mettent en œuvre des régulations motrices sur la base de la loi de contrôle CBA (partie du haut de l'Equation 17). Les seuils perceptifs délimitent la « zone de dérive » de telle sorte que plus les seuils perceptifs sont importants plus la « zone de dérive » est large et plus les profils de vitesse produits seront non-linéaires. A l'inverse, plus les seuils perceptifs sont petits, plus la zone sera petite et plus les profils de vitesse seront linéaires. Nous avons nommé cette loi de contrôle « CBA-borné » :

$$\ddot{Y} = \begin{cases} k_1 \times \frac{1}{1 + 200 \times e^{(-10 \times t)}} \times \dot{\theta} + k_2 \times \dot{Y}, \text{ if } |\dot{\theta}/\dot{\theta}_t| > 1 \\ \dot{Y}_{t-1}, \text{ if } |\dot{\theta}/\dot{\theta}_t| < 1 \end{cases} \quad (\text{Equation 17})$$

Nos résultats montrent que cette loi de contrôle « CBA-borné » permet d'expliquer le comportement produit par la population sénior et par la patiente dé-afférentée. De plus, les

résultats révèlent que les seuils perceptifs obtenus sont plus importants pour la patiente dé-afférentée que pour les séniors. Enfin, avec des seuils perceptifs inférieurs à ceux obtenus pour la patiente dé-afférentée et les séniors, cette loi de contrôle « CBA-bornée » permet également de rendre compte du comportement linéaire des jeunes. La mise en évidence de ces seuils perceptifs confirme les résultats des études qui ont montré qu'avec l'altération neurophysiologique accompagnant le vieillissement, les seuils de détection et de discrimination des mouvements augmentent (Norman, Ross, Hawkes, & Long, 2003; Snowden & Kavanagh, 2006). De plus, selon les seuils perceptifs, les angles de relèvement calculés par le modèle oscillent plus ou moins autour d'une valeur critique proche de zéro. Ces oscillations autour d'une valeur critique traduisent, selon Yilmaz et Warren (1995), la signature d'une variable qui est régulée. De façon comparable, Lenoir et al. (1999a) ont également observé des oscillations du taux de changement de l'angle de relèvement autour d'une valeur critique. Ainsi, en intégrant dans la loi de contrôle CBA, les particularités neurophysiologiques des populations sous la forme de seuils perceptifs, nous sommes en mesure d'expliquer le comportement de régulation de trois populations différentes.

2.3. Le niveau d'analyse

Nous nous sommes placés tout au long de cette thèse à un niveau d'analyse général des mécanismes de contrôle perceptivo-moteur appartenant au cadre des lois de contrôle (Warren, 1988). En proposant à des populations présentant des particularités neurophysiologiques de réaliser des interceptions, nous avons éprouvé la loi de contrôle CBA et nous avons atteint ses limites. En effet, nous n'avons pas été en mesure d'expliquer les comportements de régulations produits par les populations testées.

Nous avons donc choisi de prendre en considération les altérations neurophysiologiques des participantes en intégrant un seuil perceptif à la loi de contrôle CBA. Bootsma (1998) a proposé deux niveaux d'analyse des mécanismes perceptivo-moteurs. Le premier niveau (i.e., les lois de contrôle) résume de manière simple le couplage perceptivo-moteur en reliant une information avec un paramètre du mouvement (couplage Information-Mouvement). Le deuxième niveau proposé implique une description plus précise de ce couplage car il nécessite la prise en compte des caractéristiques neuro-musculo-squelettiques de l'agent considéré (couplage Perception-Actuation). Malgré le souhait premier de situer notre travail de thèse au

premier niveau d'analyse, nous avons souhaité intégrer certaines caractéristiques neurophysiologiques dans la loi de contrôle CBA. En effet, dans notre loi de contrôle, le seuil perceptif traduit bien l'état d'altération proprioceptif des participants (i.e., les caractéristiques neurophysiologiques). Pourtant, pour plusieurs raisons nous tenterons de montrer en quoi notre modèle « CBA-borné » ne modélise pas le couplage Perception-Actuation et reste proche du niveau des lois de contrôle.

En tout premier lieu, notre modèle se distingue des modèles appartenant au niveau Perception-Actuation dans la façon dont il intègre l'inertie du système locomoteur. Contrairement aux modèles du niveau Perception-Actuation (e.g., de Rugy et al., 2002 ; Dessing et al., 2005) notre modèle prend en compte l'inertie du système locomoteur en ajoutant un terme d'amortissement qui correspond à la vitesse des participants. En effet, chaque système locomoteur a sa propre inertie qui dépend des caractéristiques musculo-squelettiques de l'agent. Notre terme d'amortissement prend en compte ces caractéristiques de manière globale et permettra à notre modèle d'expliquer le comportement de régulation de différents agents (e.g., abeilles ou hommes) ou bien le comportement produit avec différentes interfaces comportementales (e.g., tapis roulant ou joystick). Dans les modèles comme ceux de Dessing et al. (2005) et de Rugy et al. (2002), l'inertie du système locomoteur est comprise dans la construction de réseaux neuronaux et musculo-squelettiques qui capturent la dynamique du système locomoteur. Cependant, cette intégration très précise des caractéristiques neurophysiologiques dans ce type de modèle se référant au niveau Perception-Actuation, réduit l'explication comportementale au niveau d'une catégorie d'agent bien particulière. Avec ce type de modèle, si des chercheurs veulent par exemple expliquer le comportement de deux agents distincts (abeilles ou hommes), alors ils doivent entièrement modifier le réseau neuronal intégré. Or, le fait que notre modèle nous autorise à modéliser le comportement de trois populations d'agents distinctes, permet de répondre au principe des lois de contrôle et positionne notre modèle plutôt au premier niveau d'analyse.

Même si notre modèle intègre des caractéristiques neurophysiologiques, il se différencie pourtant des modèles de Dessing et al. (2005) et de Rugy et al. (2002) sur le niveau d'intégration de ces caractéristiques neurophysiologiques. Effectivement, nos seuils perceptifs traduisent les caractéristiques neurophysiologiques des participants. Cependant, le support neurophysiologique des seuils perceptifs reste général puisque nous ne proposons pas de substrats neuronaux de ces seuils. C'est ce que propose le modèle de de Rugy et al. (2002)

dans une tâche de pointage locomoteur ou encore celui de Dessing et al. (2005) énoncé dans une tâche de capture de balle. En effet, de Rugey et al. (2002) ont par exemple intégré dans leur modèle un système neuronal contenant un générateur rythmique composé de sept paires d'oscillateurs neuronaux contrôlant chacune les mouvements d'une articulation. De la même manière, en voulant intégrer des caractéristiques neurophysiologiques dans le modèle Vitesse Requête (présenté dans le paragraphe 3.3.2.1), Dessing et al. (2005) ont par exemple suggéré que des signaux neuronaux provenant du ganglion basal modulent la vitesse requise de la main au travers des aires corticales 5 et 7. Ces deux modèles intègrent des caractéristiques neurophysiologiques très précises qui ne se situent pas au même niveau d'intégration que nos seuils perceptifs. Si l'on se réfère à la distinction des différents niveaux que fait Beek, Dessing, Peper et Bullock (2003), la frontière qui sépare le niveau des lois de contrôle du niveau Perception-Actuation se situe dans l'intégration de données comportementales et structurales (i.e., anatomique, neurophysiologique et biomécanique). Alors, notre modèle « CBA-borné » n'appartiendrait pas à ce niveau d'analyse, puisque nous n'y intégrons aucun réseau neuronal et nos seuils perceptifs permettent de prendre en compte de manière globale les altérations neurophysiologiques des populations. De plus, l'architecture simple et directe de notre modèle s'oppose à l'architecture lourde et complexe des modèles Perception-Actuation. Ainsi, cette intégration de seuils perceptifs ne dénature pas l'architecture de la loi de contrôle CBA originale puisque notre modèle met toujours en relation directe une information et un paramètre du mouvement sans intercaler de structures neuro-musculo-squelettiques intermédiaires (Beek et al., 2003). La structuration de notre modèle est donc différente et reste plus proche de l'architecture d'une loi de contrôle. Cette relation est simplement modulée par deux coefficients (i.e., des constantes) qui attribue plus de poids au couplage entre l'information et le mouvement ou bien au terme d'amortissement (i.e., à l'inertie du système).

Si le « CBA-Borné » ne répond pas aux attentes du niveau Perception-Actuation et qu'il est proche de la loi de contrôle CBA proposée par Bastin et al. (2006b, 2008), il peut toutefois être différencié de celle-ci. En plus d'avoir ajouté un terme d'amortissement prenant en compte l'inertie du système, Bastin et al. (2006b, 2008) ont également ajouté une fonction d'activation. Cette fonction a pour but de prendre en compte la dépendance graduelle du comportement de l'agent à l'information (i.e., le taux de changement de l'angle de relèvement). Cette fonction d'activation permet donc d'introduire un délai perceptif de détection de l'information. Ainsi, en début d'essai les agents détectent l'information mais ne

la prennent pas en compte et ne produisent pas de régulations. A mesure que l'essai se déroule, les comportements produits par l'agent dépendent de plus en plus de l'utilisation de l'information. Malgré cette fonction d'activation, il existe toujours une correspondance quantitative entre les changements de l'angle de relèvement et les régulations produites. Leur modèle ne répond que partiellement à la limite de la loi de contrôle CBA qui prédit une modification comportementale instantanée dès lors que l'angle de relèvement change. Rejoignant la même logique que Bastin, Fajen et Montagne (2010) de prise en compte des capacités d'actions des agents, l'intégration de ces seuils traduit la prise en considération des capacités perceptives des agents. Contrairement à la fonction d'activation, les seuils perceptifs introduits dans le « CBA-borné » permettent alors de prendre en compte tout au long de l'essai la capacité perceptive des agents. Ainsi, durant tout l'essai, si les changements de l'angle de relèvement ne sont pas supérieurs à la capacité perceptive des agents (i.e., le seuil introduit dans le modèle), ces derniers ne détectent pas l'information et ne modifient pas leur comportement. Par contre, dès que les changements de l'angle de relèvement peuvent être perçus par les agents, ils régulent leur comportement en conséquence. Ainsi, contrairement à la fonction d'activation, en capturant les possibilités perceptives des agents, notre modèle permet de répondre clairement à la limite du CBA évoquée au-dessus (i.e., modification instantanée).

CONCLUSION

Désireux de tester la robustesse d'un principe de contrôle perceptivo-moteur (loi de contrôle CBA) largement étudié, nous avons décidé de manipuler le contexte informationnel dans lequel une tâche d'interception est réalisée ainsi que les catégories d'agents réalisant la tâche. Ce travail de thèse nous a permis de dévoiler les limites d'application de ce principe de contrôle tout en démontrant son caractère robuste.

Jusqu'à une certaine limite, le principe de contrôle CBA est très robuste et permet à l'agent de répondre efficacement aux manipulations des contraintes environnementales, d'un essai à l'autre mais également au sein d'un même essai. Il semblerait toutefois que les limites d'application du principe de contrôle CBA soient liées au contexte informationnel. Ainsi, à mesure que l'environnement s'enrichit d'informations de différentes natures, les agents ne mettent plus en œuvre ce principe de contrôle et optent pour d'autres principes de contrôle

perceptivo-moteur plus efficaces. Cette thèse révèle également que le principe de contrôle CBA ne peut vraisemblablement pas être appliqué à d'autres populations que des jeunes agents. Dès lors qu'un agent présente des particularités neurophysiologiques, ce principe de contrôle ne s'applique plus. Il serait ainsi limité par les altérations neurophysiologiques que peuvent subir les agents qui l'utilisent pour contrôler leur action.

Toutefois, même si les limites d'application de ce principe de contrôle perceptivo-moteur sont réelles, remettent-elles pour autant en question la robustesse de ce principe de contrôle perceptivo-moteur. Au vue de cette thèse, la réponse est non pour deux raisons. Tout d'abord, dans un contexte informationnel dans lequel il a été prouvé que ce principe de contrôle CBA n'intervenait plus, il s'avère que si les autres principes de contrôle ne permettent plus un contrôle efficace de l'action, les agents utilisent à nouveau le principe de contrôle CBA pour réussir la tâche dans laquelle ils sont engagés. Ensuite, si ce principe de contrôle CBA échoue dans un premier temps à expliquer le comportement d'une population sénior ou une patiente dé-afférentée; le simple fait d'avoir pris en compte les capacités perceptives des agents (sans dénaturer l'architecture du principe de contrôle CBA) lui permet alors d'être appliqué au comportement de populations présentant des particularités neurophysiologiques. Ainsi, tout en dévoilant les limites d'application du principe de contrôle CBA, ce travail de thèse permet de conforter la robustesse de principe de contrôle perceptivo-moteur.

BIBLIOGRAPHIE

- Andersen, G. J., & Enriquez, A. (2006). Aging and the detection of observer and moving object collisions. *Psychol Aging*, 21(1), 74-85.
- Bardy, B. G., & Laurent, M. (1998). How is body orientation controlled during somersaulting? *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 24(3), 963-977.
- Bastin, J., Calvin, S., & Montagne, G. (2006a). Muscular proprioception contributes to the control of interceptive actions. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 32(4), 964-972.
- Bastin, J., Craig, C., & Montagne, G. (2006b). Prospective strategies underlie the control of interceptive actions. *Hum Mov Sci*, 25(6), 718-732.
- Bastin, J., Fajen, B. R., & Montagne, G. (2010). Controlling speed and direction during interception: an affordance-based approach. *Exp Brain Res*, 201(4), 763-780.
- Bastin, J., Jacobs, D. M., Morice, A. H., Craig, C., & Montagne, G. (2008). Testing the role of expansion in the prospective control of locomotion. *Exp Brain Res*, 191(3), 301-312.
- Bastin, J., & Montagne, G. (2005). The perceptual support of goal-directed displacement is context-dependent. *Neurosci Lett*, 376(2), 121-126.
- Baumberger, B., Flückiger, M., & Roland, M. (2000). Walking in an environment of moving ground texture. *Japanese Psychological Research*, 42(4), 238-250.
- Beek, P. J., Dessing, J. C., Peper, C. E., & Bullock, D. (2003). Modelling the control of interceptive actions. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 358(1437), 1511-1523.
- Benguigui, N., Ripoll, H., & Broderick, M. P. (2003). Time-to-Contact Estimation of Accelerated Stimuli Is Based on First-Order Information. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 29(6), 1083-1101.
- Benjuya, N., Melzer, I., & Kaplanski, J. (2004). Aging-induced shifts from a reliance on sensory input to muscle cocontraction during balanced standing. *J Gerontol A Biol Sci Med Sci*, 59(2), 166-171.
- Biguer, B., Donaldson, I. M., Hein, A., & Jeannerod, M. (1988). Neck muscle vibration modifies the representation of visual motion and direction in man. *Brain*, 111 (Pt 6), 1405-1424.

- Billino, J., Bremmer, F., & Gegenfurtner, K. R. (2008). Differential aging of motion processing mechanisms: evidence against general perceptual decline. *Vision Res*, 48(10), 1254-1261.
- Bloem, B. R., Allum, J. H., Carpenter, M. G., Verschuur, J. J., & Honegger, F. (2002). Triggering of balance corrections and compensatory strategies in a patient with total leg proprioceptive loss. *Exp Brain Res*, 142(1), 91-107.
- Blouin, J., Bard, C., Teasdale, N., Paillard, J., Fleury, M., Forget, R., et al. (1993). Reference systems for coding spatial information in normal subjects and a deafferented patient. *Exp Brain Res*, 93(2), 324-331.
- Blouin, J., Teasdale, N., & Mouchnino, L. (2007). Vestibular signal processing in a subject with somatosensory deafferentation: the case of sitting posture. *BMC Neurol*, 7, 25.
- Blouin, J., Vercher, J. L., Gauthier, G. M., Paillard, J., Bard, C., & Lamarre, Y. (1995). Perception of passive whole-body rotations in the absence of neck and body proprioception. *J Neurophysiol*, 74(5), 2216-2219.
- Bootsma, R. J. (1998). Ecological movement principles and how much information matters. In A. Post, J. R. Pijpers, P. Bosch & M. S. J. Boschker (Eds.), *Models in human movement science* (pp. 51-63): Print Partners Ipskamp, Enschede.
- 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. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 23(4), 1282-1289.
- Bootsma, R. J., & Oudejans, R. u. R. (1993). Visual information about time-to-collision between two objects. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 19(5), 1041-1052.
- Bootsma, R. J., & Van Wieringen, P. C. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 16(1), 21-29.
- Bowman, K. J., & Brown, B. (1989). Comparison of velocity detection in young and older observers in a simulated night driving situation. *Australian Government. Department of infrastructure, Transport, Regional Development and Local Government*, 1-8.
- Brenner, E. L. I., & van den Berg, A. V. (1996). The Special Role of Distant Structures in Perceived Object Velocity. *Vision Research*, 36(23), 3805-3814.

- Bruggeman, H., Zosh, W., & Warren, William H. (2007). Optic Flow Drives Human Visuo-Locomotor Adaptation. *Curr Biol*, 17(23), 2035-2040.
- Camachon, C., Buekers, M., & Montagne, G. (2004). Is the learning of goal-directed displacement effector-independent? *Hum Mov Sci*, 23(3-4), 239-255.
- Chapman, S. (1968). Catching a baseball. *Am J Phys*, 36(10), 868-870.
- Chardenon, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002). The visual control of ball interception during human locomotion. *Neurosci Lett*, 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? *Exp Brain Res*, 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. *J Mot Behav*, 37(1), 52-64.
- Chohan, A., Savelsbergh, G. J., van Kampen, P., Wind, M., & Verheul, M. H. (2006). Postural adjustments and bearing angle use in interceptive actions. *Exp Brain Res*, 171(1), 47-55.
- Chohan, A., Verheul, M. H., Van Kampen, P. M., Wind, M., & Savelsbergh, G. J. (2008). Children's use of the bearing angle in interceptive actions. *J Mot Behav*, 40(1), 18-28.
- Cooke, J. D., Brown, S., Forget, R., & Lamarre, Y. (1985). Initial agonist burst duration changes with movement amplitude in a deafferented patient. *Exp Brain Res*, 60(1), 184-187.
- Cox, E. M., & Dyre, B. P. (1999). Control of Egospeed: Influence of Discontinuity Rate and Global Optical Flow Rate. *Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting Proceedings*, 43, 1409-1409.
- Davis, W. J., & Ayers, J. L., Jr. (1972). Locomotion: control by positive-feedback optokinetic responses. *Science*, 177(44), 183-185.
- de Oliveira, R. F., Huys, R., Oudejans, R. R., van de Langenberg, R., & Beek, P. J. (2007). Basketball jump shooting is controlled online by vision. *Exp Psychol*, 54(3), 180-186.

- de Rugy, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2000a). The control of human locomotor pointing under restricted informational conditions. *Neurosci Lett*, 281(2-3), 87-90.
- de Rugy, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2000b). The study of locomotor pointing in virtual reality: the validation of a test set-up. *Behav Res Methods Instrum Comput*, 32(4), 515-520.
- de Rugy, A., Taga, G., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002). Perception--action coupling model for human locomotor pointing. *Biol Cybern*, 87(2), 141-150.
- De Smet, K., Malcolm, P., Lenoir, M., Segers, V., & De Clercq, D. (2009). Effects of optic flow on spontaneous overground walk-to-run transition. *Exp Brain Res*, 193(4), 501-508.
- Desmurget, M., & Grafton, S. (2000). Forward modeling allows feedback control for fast reaching movements. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 423-431.
- Dessing, J. C., Peper, C. L., Bullock, D., & Beek, P. J. (2005). How position, velocity, and temporal information combine in the prospective control of catching: data and model. *J Cogn Neurosci*, 17(4), 668-686.
- Diaz, G., Phillips, F., & Fajen, B. (2009). Intercepting moving targets: a little foresight helps a lot. *Exp Brain Res*, 195(3), 345-360.
- Duchon, A. P., Kaelbling, L. P., & Warren, W. H. (1998). Ecological Robotics (Vol. 6, pp. 473-507).
- Duchon, A. P., & Warren, W. H., Jr. (2002). A visual equalization strategy for locomotor control: of honeybees, robots, and humans. *Psychol Sci*, 13(3), 272-278.
- Fahle, M., & Wehrhahn, C. (1991). Motion perception in the peripheral visual field. *Graefes's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 229(5), 430-436.
- Fajen, B. R. (2005a). Perceiving possibilities for action: On the necessity of calibration and perceptual learning for the visual guidance of action. *Perception*, 34(6), 717-740.
- Fajen, B. R. (2005b). Calibration, information, and control strategies for braking to avoid a collision. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 31(3), 480-501.
- Fajen, B. R., & Warren, W. H. (2003). Behavioral dynamics of steering, obstacle avoidance, and route selection. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 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. *Exp Brain Res*, 180(2), 303-319.
- Fleury, M., Bard, C., Teasdale, N., Paillard, J., Cole, J., Lajoie, Y., et al. (1995). Weight judgment. The discrimination capacity of a deafferented subject. *Brain*, 118 (Pt 5), 1149-1156.
- Forget, R., & Lamarre, Y. (1995). Postural adjustments associated with different unloadings of the forearm: effects of proprioceptive and cutaneous afferent deprivation. *Can J Physiol Pharmacol*, 73(2), 285-294.
- Francois, M., Morice, A. H., Blouin, J., & Montagne, G. (2010). Age-related decline in sensory processing for locomotion and interception. *Neuroscience*.
- Gauthier, G. M., Nommay, D., & Vercher, J. L. (1990). The role of ocular muscle proprioception in visual localization of targets. *Science*, 249(4964), 58-61.
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*: Houghton Mifflin (Boston).
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*: Houghton Mifflin (Boston).
- Gibson, J. J. (1998). Visually Controlled Locomotion and Visual Orientation in Animals (Vol. 10, pp. 161 - 176): Routledge.
- Holt, K. G., Hamill, J., & Andres, R. O. (1991). Predicting the minimal energy costs of human walking (Vol. 23, pp. 491-498).
- Hreljac, A. (1995). Determinants of the gait transition speed during human locomotion: kinematic factors. *J Biomech*, 28(6), 669-677.
- Ivanenko, Y. P., Grasso, R., & Lacquaniti, F. (2000). Influence of leg muscle vibration on human walking. *J Neurophysiol*, 84(4), 1737-1747.
- Jacobs, D. M., & Michaels, C. F. (2006). Lateral interception I: Operative optical variables, attunement, and calibration. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 32(2), 443-458.

- Jacobs, D. M., Silva, P. L., & Calvo, J. (2009). An Empirical Illustration and Formalization of the Theory of Direct Learning: The Muscle-Based Perception of Kinetic Properties. *Ecol Psychol*, 21(3), 245 - 289.
- Jeannerod, M. (1991). The interaction of visual and proprioceptive cues in controlling reaching movements. In D. R. Humphrey, & Freund H.J. (Ed.), *Motor control: Concepts and issues* (pp. 277-291): New York: Wiley.
- Karnath, H. O., Sievering, D., & Fetter, M. (1994). The interactive contribution of neck muscle proprioception and vestibular stimulation to subjective "straight ahead" orientation in man. *Exp Brain Res*, 101(1), 140-146.
- Kerzel, D., Hecht, H., & Kim, N.-G. (2001). Time-to-passage judgments on circular trajectories are based on relative optical acceleration (Vol. 63, pp. 1153-1170).
- Konczak, J. (1994). Effects of optic flow on the kinematics of human gait: a comparison of young and older adults. *J Mot Behav*, 26(3), 225-236.
- Kugler, P., & Turvey, M. T. (1987). Information, natural law, and the self-assembly of rhythmic movement. In N. J. Hillsdale, & Erlbaum, L. (Ed.).
- Lajoie, Y., Paillard, J., Teasdale, N., Bard, C., Fleury, M., Forget, R., et al. (1992). Mirror drawing in a deafferented patient and normal subjects: visuoproprioceptive conflict. *Neurology*, 42(5), 1104-1106.
- Lanchester, B. S., & Mark, R. F. (1975). Pursuit and prediction in the tracking of moving food by a teleost fish (*Acanthaluteres spilomelanurus*). *J Exp Biol*, 63(3), 627-645.
- Larish, J. F., & Flach, J. M. (1990). Sources of optical information useful for perception of speed of rectilinear self-motion. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 16(2), 295-302.
- Laurent, M., Montagne, G., & Durey, A. (1996). Binocular invariants in interceptive tasks: a directed perception approach. *Perception*, 25(12), 1437-1450.
- 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., & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception and Psychophysics*, 15(3), 529-532.
- Lee, D. N., Davies, M. N. O., Green, P. R., & Van Der Weel, F. R. (1993). Visual control of velocity of approach by pigeons when landing (Vol. 180, pp. 85-104).

- Lee, D. N., Lishman, J. R., & Thomson, J. A. (1982). Regulation of gait in long jumping. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 8(3), 448-459.
- Lee, D. N., & Reddish, P. E. (1981). Plummeting gannets: a paradigm of ecological optics. *Nature*, 293(5830), 293-294.
- Lenoir, M., Musch, E., Janssens, M., Thiery, E., & Uyttenhove, J. (1999a). Intercepting Moving Objects During Self-Motion. *J Mot Behav*, 31(1), 55-67.
- Lenoir, M., Musch, E., Thiery, E., & Savelsbergh, G. J. (2002). Rate of change of angular bearing as the relevant property in a horizontal interception task during locomotion. *J Mot Behav*, 34(4), 385-404.
- Lenoir, M., Savelsbergh, G. J., Musch, E., Thiery, E., Uyttenhove, J., & Janssens, M. (1999b). Intercepting moving objects during self-motion: effects of environmental changes. *Res Q Exerc Sport*, 70(4), 349-360.
- Lenoir, M., Vansteenkiste, J., Vermeulen, J., & de Clercq, D. (2005). Effects of contrasting colour patterns of the ball in the volleyball reception (Vol. 23, pp. 871 - 879): *J Sports Sci*.
- Llewellyn, K. R. (1971). Visual guidance of locomotion. *J Exp Psychol*, 91(2), 245-261.
- Lobjois, R., Benguigui, N., Bertsch, J., & Broderick, M. P. (2008). Collision avoidance behavior as a function of aging and tennis playing. *Exp Brain Res*, 184(4), 457-468.
- Mazyn, L. I., Savelsbergh, G. J., Montagne, G., & Lenoir, M. (2007). Planning and on-line control of catching as a function of perceptual-motor constraints. *Acta Psychol (Amst)*, 126(1), 59-78.
- McKee, S. P., & Nakayama, K. (1984). The detection of motion in the peripheral visual field. *Vision Res*, 24(1), 25-32.
- McKee, S. P., Silverman, G. H., & Nakayama, K. (1986). Precise velocity discrimination despite random variations in temporal frequency and contrast. *Vision Res*, 26(4), 609-619.
- Michaels, C. F., & Oudejans, R. R. D. (1992). The Optics and Actions of Catching Fly Balls: Zeroing Out Optical Acceleration (Vol. 4, pp. 199 - 222): *Ecol Psychol*.

- Mohler, B. J., Thompson, W. B., Creem-Regehr, S. H., Pick, H. L., Jr., & Warren, W. H., Jr. (2007). Visual flow influences gait transition speed and preferred walking speed. *Exp Brain Res*, 181(2), 221-228.
- Monaco, W. A., Kalb, J. T., & Johnson, C. A. (2007). Motion detection in the far peripheral visual field. *Report ARL-AMR-0684*.
- Montagne, G. (2005). Prospective control in sport. *Intl J Sport Psychol*, 36, 127-150.
- Montagne, G., Buekers, M., Camachon, C., de Rugy, A., & Laurent, M. (2003). The learning of goal-directed locomotion: a perception-action perspective. *Q J Exp Psychol A*, 56(3), 551-567.
- Montagne, G., Cornus, S., Glize, D., & Quaine, F. (2000). A perception-action coupling type of control in long jumping. *J Mot Behav*, 32(1), 37-43.
- Montagne, G., Fraise, F., Ripoll, H., & Laurent, M. (2000). Perception-action coupling in an interceptive task: First-order time-to-contact as an input variable. *Hum Movement Sci*, 19(1), 59-72.
- Montagne, G., Laurent, M., Durey, A., & Bootsma, R. (1999). Movement reversals in ball catching. *Exp Brain Res*, 129(1), 87-92.
- Morgan, R., & King, D. (1995). The older driver - a review. *Medecine in the Elderly*, 71, 525-528.
- Morice, A. H., Francois, M., Jacobs, D. M., & Montagne, G. (2010). Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Exp Brain Res*, 202(2), 397-411.
- Mulder, T., Zijlstra, W., & Geurts, A. (2002). Assessment of motor recovery and decline. *Gait & Posture*, 16(2), 198-210.
- Norman, J. F., Ross, H. E., Hawkes, L. M., & Long, J. R. (2003). Aging and the perception of speed. *Perception*, 32(1), 85-96.
- Olberg, R. M., Worthington, A. H., & Venator, K. R. (2000). Prey pursuit and interception in dragonflies. *J Comp Physiol A*, 186(2), 155-162.
- Ooi, T. L., Wu, B., & He, Z. J. (2001). Distance determined by the angular declination below the horizon. *Nature*, 414(6860), 197-200.

- Pailhous, J., Ferrandez, A. M., Fluckiger, M., & Baumberger, B. (1990). Unintentional modulations of human gait by optical flow. *Behav Brain Res*, 38(3), 275-281.
- Paillard, J. (1987). *Cognitive versus sensorimotor encoding of spatial information. In cognitive processing and spatial orientation in animal and man* (Ellen P, Blanc-Thinus C ed. Vol. 2): Dordrecht : Martinus Nijhoff.
- 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. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 20(3), 591-612.
- Prokop, T., Schubert, M., & Berger, W. (1997). Visual influence on human locomotion. Modulation to changes in optic flow. *Exp Brain Res*, 114(1), 63-70.
- Rieser, J. J., Pick, H. L., Jr., Ashmead, D. H., & Garing, A. E. (1995). Calibration of human locomotion and models of perceptual-motor organization. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 21(3), 480-497.
- Riviere, C. N., & Thakor, N. V. (1996). Effects of age and disability on tracking tasks with a computer mouse: accuracy and linearity. *J Rehabil Res Dev*, 33(1), 6-15.
- Roll, R., Velay, J. L., & Roll, J. P. (1991). Eye and neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually oriented activities. *Exp Brain Res*, 85(2), 423-431.
- Runeson, S. (1977). On the possibility of "smart" perceptual mechanisms. *Scand J Psychol*, 18(3), 172-179.
- Rushton, S. K., Harris, J. M., Lloyd, M. R., & Wann, J. P. (1998). Guidance of locomotion on foot uses perceived target location rather than optic flow. *Curr Biol*, 8(21), 1191-1194.
- Rushton, S. K., & Salvucci, D. D. (2001). An egocentric account of the visual guidance of locomotion. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(1), 6-7.
- Salthouse, T. A. (2000). Aging and measures of processing speed. *Biol Psychol*, 54(1-3), 35-54.
- Sarlegna, F. R. (2006). Impairment of online control of reaching movements with aging: a double-step study. *Neurosci Lett*, 403(3), 309-314.
- Savelsbergh, G. J., Whiting, H. T., & Bootsma, R. J. (1991). Grasping tau. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 17(2), 315-322.

- Schöner, G., & Dose, M. (1992). A dynamical systems approach to task-level system integration used to plan and control autonomous vehicle motion. *Robotics and Autonomous Systems*, 10(4), 253-267.
- Smith, M. R. H., Flach, J. M., Dittman, S. M., & Stanard, T. (2001). Monocular optical constraints on collision control. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 27(2), 395-410.
- Snowden, R. J., & Kavanagh, E. (2006). Motion perception in the ageing visual system: minimum motion, motion coherence, and speed discrimination thresholds. *Perception*, 35(1), 9-24.
- Spirduso, W. W., & MacRae, P. G. (1990). Motor performance and aging. In J. E. Birren, Schaie, K.W. (Ed.), *Handbook of the Psychology of Aging* (Vol. 3, pp. 183-200): San Diego: Academic Press.
- Srinivasan, M. V., Lehrer, M., Kirchner, W. H., & Zhang, S. W. (1991). Range perception through apparent image speed in freely flying honeybees. *Vis Neurosci*, 6(5), 519-535.
- Starkes, J., Helsen, W., & Elliott, D. (2002). A ménage à trois: the eye, the hand and on-line processing (Vol. 20, pp. 217 - 224): J Sports Sci.
- Taga, G. (1998). A model of the neuro-musculo-skeletal system for anticipatory adjustment of human locomotion during obstacle avoidance. *Biol Cybern*, 78(1), 9-17.
- Taylor, J. L., & McCloskey, D. I. (1991). Illusions of head and visual target displacement induced by vibration of neck muscles. *Brain*, 114 (Pt 2), 755-759.
- Telford, L., Howard, I. P., & Ohmi, M. (1995). Heading judgments during active and passive self-motion. *Exp Brain Res*, 104(3), 502-510.
- Thomson, J. A. (1983). Is continuous visual monitoring necessary in visually guided locomotion? *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 9(3), 427-443.
- Tran, D. B., Silverman, S. E., Zimmerman, K., & Feldon, S. E. (1998). Age-related deterioration of motion perception and detection. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 236(4), 269-273.
- Tresilian, J. R. (2005). Hitting a moving target: Perception and action in the timing of rapid interceptions (Vol. 67, pp. 129-149).

- Tydesley, D. A., & Whiting, H. T. A. (1975). Operational timing. *J Hum Movement Stu*, 1, 172-177.
- van Hedel, H. J., & Dietz, V. (2004). The influence of age on learning a locomotor task. *Clin Neurophysiol*, 115(9), 2134-2143.
- Voelcker-Rehage, C. (2008). Motor-skill learning in older adults—a review of studies on age-related differences. *European Review of Aging and Physical Activity*, 5(1), 5-16.
- Wann, J. P., & Wilkie, R. M. (2004). How do we control high speed steering? In *Optic flow and beyond* (pp. 401-419): Kluwer Academic Publishers.
- Warren, R. (1982). Optical transformation during movement: Review of the optical concomitant of egospeed. *Final technical report for grant No. AFOSR-81-0108. Columbus. Ohio State University, Department of Psychology, Aviation Psychology Laboratory.*
- Warren, W. H. (1988). Action modes and laws of control for the visual guidance of action. In O. G. Meijer & K. Roth (Eds.), *Complex Movement behaviour: 'The' motor-action controversy* (pp. 339-380): Amsterdam, NL: North Holland.
- Warren, W. H. (1998). Visually Controlled Locomotion: 40 years Later (Vol. 10, pp. 177 - 219): Ecological Psychology.
- Warren, W. H. (2006). The dynamics of perception and action. *Psychol Rev*, 113(2), 358-389.
- Warren, W. H. (2007). Action-scaled information for the visual control of locomotion. In G. J. Pepping & M. A. Grealy (Eds.), *Closing the gap: the scientific writings of David N. Lee* (pp. 243-258): Erlbaum, Mahwah.
- Warren, W. H., Jr. (1984). Perceiving affordances: visual guidance of stair climbing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 10(5), 683-703.
- Warren, W. H., Jr., Blackwell, A. W., & Morris, M. W. (1989). Age Differences in Perceiving the Direction of Self-Motion From Optical Flow. *J Gerontol*, 44(5), 147-153.
- Warren, W. H., Jr., Kay, B. A., Zosh, W. D., Duchon, A. P., & Sahuc, S. (2001). Optic flow is used to control human walking. *Nat Neurosci*, 4(2), 213-216.
- Warren, W. H., Jr., Morris, M. W., & Kalish, M. (1988). Perception of translational heading from optical flow. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 14(4), 646-660.

- Warren, W. H., Jr., & Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 13(3), 371-383.
- Warren, W. H., Jr., Young, D. S., & Lee, D. N. (1986). Visual control of step length during running over irregular terrain. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 12(3), 259-266.
- Warren, W. H., & Kay, B. A. (1997). Control law switching during visually guided walking. *Abs Psychonomic soc*, 2, 52.
- Welford, A. T. (1988). Reaction time, speed of performance, and age. *Ann N Y Acad Sci*, 515, 1-17.
- Wilkie, R., & Wann, J. (2003). Controlling steering and judging heading: Retinal flow, visual direction, and extraretinal information. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 29(2), 363-378.
- Wilkie, R. M., & Wann, J. P. (2002). Driving as Night Falls: The Contribution of Retinal Flow and Visual Direction to the Control of Steering. *Curr Biol*, 12(23), 2014-2017.
- Wilkie, R. M., & Wann, J. P. (2005). The Role of Visual and Nonvisual Information in the Control of Locomotion. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 31(5), 901-911.
- Yilmaz, E. H., & Warren, W. H., Jr. (1995). Visual control of braking: a test of the tau hypothesis. *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 21(5), 996-1014.
- Zago, M., McIntyre, J., Senot, P., & Lacquaniti, F. (2009). Visuo-motor coordination and internal models for object interception. *Exp Brain Res*, 192(4), 571-604.
- Zhang, C., Hua, T., Li, G., Tang, C., Sun, Q., & Zhou, P. (2008). Visual functions declines during normal aging. *Curr Science*, 95(11), 1544-1550.

Les limites d'application d'un principe de contrôle perceptivo-moteur

RESUME

Ce travail s'intéresse aux mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent le contrôle d'une action d'interception avec déplacement. Plus particulièrement, l'objectif principal de cette thèse était d'éprouver la robustesse d'un principe de contrôle perceptivo-moteur basé sur l'annulation des variations de l'angle de relèvement, en manipulant d'une part la richesse informationnelle de l'environnement, et d'autre part, en testant des populations d'agents qui présentaient des caractéristiques neurophysiologiques particulières.

Nous avons utilisé une plateforme de réalité virtuelle ainsi que des protocoles de dé-corrélation et/ou de restriction des informations. Ce dispositif de réalité virtuelle était constitué d'un grand écran situé face aux participants, couplé avec différentes interfaces comportementales (i.e., un tapis roulant ou un joystick).

Les résultats obtenus montrent jusqu'à une certaine limite, que le principe de contrôle perceptivo-moteur testé (CBA) est suffisamment robuste pour faire face aux contraintes environnementales. Cependant, au-delà d'une limite liée au contexte informationnel, les agents optent pour un autre principe de contrôle. Nos résultats révèlent également que le principe de contrôle CBA est suffisamment robuste pour expliquer le comportement de populations distinctes (jeune, sénior, patiente dé-afférentée), si la capacité perceptive des agents est intégrée sous forme de seuils perceptifs (traduisant l'état d'altération proprioceptif)

Ce travail de thèse a permis de délimiter le champ d'application d'un principe de contrôle perceptivo-moteur particulier tout en démontrant son caractère robuste.

Mots Clés : Loi de contrôle – Approche écologique – Interception – Couplage perceptivo-moteur – Proprioception

The limitations of the application of a principle of perceptual-motor control

SUMMARY

The purpose of this thesis was to investigate the perceptual-motor mechanisms that underlie the control of an interceptive action with movement. More specifically, the research undertaken tested the robustness of a principle of perceptual-motor control based on the cancellation of the rate of change of the bearing angle, in one hand by manipulating the informative richness of the environment; and secondly, by testing populations agents that presented with specific neurophysiological characteristics.

A virtual reality setup and de-correlation and/or restricted protocols of information were used. This virtual reality device consisted of a large screen located in front of participants, coupled with different behavioral interfaces (i.e., a treadmill or a joystick).

The results obtained demonstrated that to a certain extent, the principle of perceptual-motor control tested (CBA) was sufficiently robust to cope with environmental constraints. Dependent on contextual information however, agents relied on a different principle of control. The results also indicated that the principle of control CBA was robust enough to explain the behavior of distinct populations (i.e., Young, Middle-aged, deafferented patients), if the perceptive capacity of agents was integrated as perceptual thresholds (reflecting the state of impaired proprioception).

In summary, this thesis not only delimited the scope of application of a particular principle of perceptual-motor control but also demonstrated its robustness.

Key words: Law of control – Ecological Psychology – Interception – Perceptual-motor coupling – Proprioception