Influence de la gravité sur la perception et l'interrception d'objets en mouvement

Robin Baurès

▶ **To cite this version:**

Robin Baurès. Influence de la gravité sur la perception et l'interrception d'objets en mouvement. Autre [q-bio.OT]. Université Paris Sud - Paris XI, 2008. Français. NNT : . tel-00265175

HAL Id: tel-00265175
https://theses.hal.science/tel-00265175

Submitted on 18 Mar 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Numéro d'ordre :

UNIVERSITÉ PARIS-SUD 11

École Doctorale 456

Laboratoire Contrôle Moteur et Perception

(UPRES EA 4042)

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du

Grade de Docteur en

« Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain »

Présentée par

Robin BAURÈS

Influence de la gravité sur la perception et l'interception d'objets en mouvement

Soutenue publiquement le 11 décembre 2007 devant la commission d'examen composée de :

M.-A. Amorim	Maitre de Conférences HDR, Université Paris-Sud 11	Co-directeur
N. Benguigui	Maitre de Conférences, Université Paris-Sud 11	Co-directeur
H. Hecht	Professeur, Université Johannes Gutenberg, Mainz	Examinateur
J. McIntyre	Chargé de Recherches HDR, CNRS - Université Paris 5	Examinateur
G. Montagne	Professeur, Université de la Méditerranée, Marseille	Rapporteur
V. Nougier	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble	Rapporteur

Numéro d'ordre :

UNIVERSITÉ PARIS-SUD 11

École Doctorale 456

Laboratoire Contrôle Moteur et Perception

(UPRES EA 4042)

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du

Grade de Docteur en

« Sciences du Sport, de la Motricité et du Mouvement Humain »

Présentée par

Robin BAURÈS

Influence de la gravité sur la perception et l'interception d'objets en mouvement

Soutenue publiquement le 11 décembre 2007 devant la commission d'examen composée de :

M.-A. Amorim	Maitre de Conférences HDR, Université Paris-Sud XI	Co-directeur
N. Benguigui	Maitre de Conférences, Université Paris-Sud XI	Co-directeur
H. Hecht	Professeur, Université Johannes Gutenberg, Mainz	Examinateur
J. McIntyre	Chargé de Recherches HDR, CNRS - Université Paris 5	Examinateur
G. Montagne	Professeur, Université de la Méditerranée, Marseille	Rapporteur
V. Nougier	Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble	Rapporteur

Remerciements

Tout travail possède un commencement. Voici plus de cinq ans que Nicolas Benguigui m'encadre durant mes travaux de recherche, tout d'abord en maîtrise, DEA, puis maintenant cette thèse. J'ai pu mesurer tout au long de ces cinq années l'étendue de ses qualités scientifiques tout d'abord, mais aussi humaines. Merci infiniment Nicolas pour tous ces moments passionnants, ton investissement et ta confiance sans limite.

J'ai eu la grande chance d'être co-encadré par Michel-Ange Amorim durant cette thèse. Michel-Ange, je ne te remercierai jamais assez pour tous tes conseils, tes qualités d'écoute, et ta disponibilité sans faille.

Un immense merci aussi à Isabelle Siegler pour la partie modélisation de l'expérience 1, ainsi que pour toutes les questions auxquelles elle a pris le temps de répondre !

Merci aussi à Paul Fourcade et Brice Isableu, qui chacun dans leur domaine de compétences respectif n'ont pas manqué de m'aider dès que le besoin s'en est fait ressentir. Un grand merci aussi à Jérôme Banal pour la création du logiciel Interceptor.

Je tiens à remercier les membres de ce jury de thèse, messieurs Heiko Hecht, Joseph McIntyre, Gilles Montagne et Vincent Nougier pour avoir accepté de lire et d'expertiser ce document, et de confronter leur opinion que je sais parfois divergente avec celle défendue ici.

Merci à Jean Bertsch, Directeur de l'Ecole Doctorale 456, pour l'allocation attribuée m'ayant permis de me consacrer entièrement à ce travail. Les week-end de repos ainsi permis n'ont pas été de trop.

La thèse n'aurait pas été possible sans l'aide et la détente apportées par tous les autres doctorants et anciens doctorants des trois laboratoires, Antoine sans qui je traiterais encore mes données, Benoit, Carole, Julie, Thomas, Marie Eloïse, Djiby, Hela, Perrine, Cyrille, Delphine et Anaïs, ainsi que d'autres doctorants disséminés ailleurs en France, Bruno et Grégoire. Merci aussi à Zakaria pour sa bonne humeur, Paul Marie Descoins et Bruno Farnier pour tout le matériel emprunté sans réservation…

Merci à tous les enseignants et personnels de l'UFR STAPS pour leur gentillesse et leur aide.

Merci aux 387 personnes ayant accepté de participer à l'une des expériences menées, depuis ma maîtrise jusqu'à cette thèse, et sans qui les hypothèses ne restent qu'…hypothèses.

Merci à mes parents, mon frère et ma sœur pour leurs encouragements, à Barbara pour son aide sur l'anglais ainsi que toute ma famille.

Enfin, je tiens à remercier Elisabeth, pour tout son amour et son attention, sa patience et son soutien, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible.

TABLE DES MATIERES

Remerciements **3**

Avant Propos **8**

Introduction **9**

Cadre théorique **14**

1.1 Rappel historique des théories dans les actions d'interception **15**

1.2 Interception d'un objet accéléré **19**

1.2.1 Proposition des théories écologiques 19

1.2.2 Les théories computationnelles et l'internalisation de la gravité 23

1.2.3. Preuves expérimentales de l'internalisation de la gravité 25

1.2.3.1. Les tâches de jugement perceptif *25*

1.2.3.2 Les tâches d'interception *26*

1.2.4 Deux modèles internes de la gravité différents pour percevoir ou agir 39

1.2.5 Limites méthodologiques et interprétations alternatives 41

1.2.6 Limites théoriques du modèle interne quantitatif de la gravité 51

1.3 Discussion **58**

1.4 Hypothèse **69**

Chapitre 2 Gravité et tâches de jugement perceptif **72**

2.1 Expérimentation 1 ..... **73**

2.1.1 Problématique 73

2.1.2 Protocole expérimental 77

2.1.3 Résultats 79

2.1.4 Modélisation des données 88

2.1.6 Conclusions 97

2.2 Expérimentation 2 99

2.2.1 Problématique 99

2.2.2 Protocole expérimental 103

2.2.3 Résultats 109

2.2.4 Conclusion 109

2.3 Conclusion du chapitre 2 111

Chapitre 3 Gravité et actions d'interception indirecte 113

3.1 Expérimentation 3 114

3.1.1 Problématique 114

3.1.2 Protocole expérimental 116

3.1.3 Résultats 119

3.1.4 Conclusions 122

3.2 Expérimentation 4 124

3.2.1 Protocole expérimental 124

3.2.2 Résultats 126

3.2.3 Conclusion 131

3.3 Expérimentation 5 132

3.3.1 Problématique 132

3.3.2 Protocole expérimental 132

3.3.3 Résultats 134

3.3.4 Conclusions 137

3.4 Conclusion du chapitre 3 139

Chapitre 4 Gravité et actions d'interception directe 141

4.1 Expérimentation 6 142

4.1.1 Problématique 142

4.1.2 Protocole expérimental 143
4.1.3 Résultats 152
4.1.4 Conclusions 154
4.2 Expérimentation 7 156
4.2.1 Problématique 156
4.2.2 Protocole expérimental 157
4.2.3 Résultats 159
4.2.4 Conclusions 163
4.3 Conclusion du chapitre 4 165

Discussion générale 166
5.1 Résumé des résultats expérimentaux 167
5.2 Autres effets de la gravité et de différentes constantes environnementales 172
5.3 Perspectives 178

Références bibliographiques 181

Expérimentations contrôles 204
Expérimentation contrôle de l'expérience 1 205
Expérimentation contrôle 1 de l'expérience 3 206
Expérimentation contrôle 2 de l'expérience 3 208

Annexes 211
Annexe A 212
Annexe B 213
Annexe C 214
Annexe D 215

Résumé 216

Avant Propos

Les travaux antérieurs amenant à cette thèse ont permis la publication de l'article et la communication orale suivante (respectivement) :

1. Benguigui, N., Broderick, M. P., Baurès, R., & Amorim, M.-A. (sous presse). Motion prediction and the velocity effect in children. *British Journal of Developmental Psychology.*

2. Baurès, R., Benguigui, N., Amorim, M.-A. & Bardy, B. G. (2005). Intercepter une balle en chute libre : le rôle du modèle interne de la gravité en question. 11ème congrès de l'ACAPS, 26 - 28 Octobre 2005, Paris, France. In Benguigui, N., Fontayne, N., Desbordes, M., & Bardy, B. G. (Eds.), *Recherches actuelles en sciences du sport* (pp. 401-402). EDP Sciences.

Le cadre théorique de cette thèse ainsi que les chapitres expérimentaux ont permis la publication de l'article ainsi que les communications orales et affichées suivantes :

3. Baurès, R., Benguigui, N., Amorim, M.-A., & Siegler, I.A. (2007). Intercepting free falling objects: better use Occam's razor than internalize Newton's law. *Vision Research, 47*, 2982-2991.

4. Morice, A. H. P., Baurès, R., Amorim, M.-A., Siegler, I. A. & Benguigui, N., (2007). Embodied perception of gravity when bouncing a ball. 30th European Conference on Visual Perception, 27-31 August 2007, Arezzo, Italy. *Perception, 36 (supplement)*, 94-95.

5. Baurès, R., Benguigui, N., Amorim, M.-A. (2007). Interceptive actions: effect of the time window. 12ème congrès de l'ACAPS, 31 Octobre - 2 Novembre 2007, Leuven, Belgique.

6. Baurès, R., Benguigui, N., & Amorim, M.-A. (2007). Does knowledge of object mass affect interception of a free-falling object? 30th European Conference on Visual Perception, 27-31 August 2007, Arezzo, Italy. *Perception, 36 (supplement)*, 170.

7. Baurès, R., Benguigui, N., Amorim, M.-A. (2007). The mass of the ball does not influence the timing of interceptive actions. 12ème congrès de l'ACAPS, 31 Octobre - 2 Novembre 2007, Leuven, Belgique.

Enfin, la réflexion issue de cette thèse a permis la soumission de l'article suivant :

8. Benguigui, N., & Baurès, R. (soumis). Visuomotor delay in interceptive actions. *Behavioral and Brain Sciences*.

Introduction

Introduction

Le 6 octobre 2007, l'équipe de France de rugby battait les All Blacks, grâce notamment à un essai de Thierry Dusautoir en milieu de partie. Pour marquer cet essai collectif, pas moins de 10 passes ont été nécessaires sur plusieurs temps de jeu. Pour que l'essai soit marqué, chaque passeur a dû déterminer à quel endroit la passe devait être réalisée pour être attrapable par un coéquipier en pleine course, pendant que ce dernier devait estimer le temps d'arrivée de la balle pour la saisir correctement. Les interceptions étaient réussies... pour un exploit sans lendemain !

Le 4 février 2001, Gregory Anquetil, récupérant la balle sur un engagement rapide, dépassait les défenseurs pour se présenter au tir devant le gardien Suédois, Peter Gentzel. La France était alors menée d'un but à quelques secondes de la fin du match. Malgré la fatigue, l'enjeu, et l'angle fermé, Gregory Anquetil battait le gardien de but. Celui-ci n'avait pas réussi à placer une partie de son corps au bon endroit au bon moment, et le but était marqué. Gregory Anquetil arrachait les prolongations, permettant à la France de devenir championne du Monde de handball quelques minutes plus tard. Pour notre plus grand bonheur, cette fois l'interception était ratée…

De nombreuses situations sportives impliquent des actions d'interception. Faire une passe, recevoir la balle, reprendre la balle de volée, et même plaquer l'adversaire ! Dans toutes ces actions, il est nécessaire de placer son corps, sa main, sa raquette, au bon endroit, au bon moment, avec la bonne dynamique, pour entrer en contact efficacement avec la balle, l'adversaire, etc.

En remontant le temps, on peut considérer que les actions d'interception, décrites le plus souvent dans le cadre d'activités sportives et ludiques, ont été initialement développées dans des activités éminemment plus vitales (Nijhawan, sous presse). En effet, la survie des premiers hommes a reposé, entre autres, sur leur capacité à éviter certains contacts (avec des

prédateurs), ou à en provoquer (pour capturer des proies). Le monde animal est d'ailleurs toujours concerné au plus haut point par cette activité : manger, et éviter d'être mangé.

Une composante qui paraît essentielle à la réussite des actions d'interception est la capacité des observateurs à estimer précisément le temps qu'un objet va mettre à atteindre le point d'interception. Pour estimer ce temps-avant-contact ou temps de pré-contact (*time-to-contact* : TTC), de nombreuses sources d'informations différentes sont possibles. Pour la plupart, ces informations donnent accès à une estimation précise du TTC lorsque l'objet se déplace à vitesse constante.

Cependant, une des questions qui se pose à propos de la composante temporelle des actions d'interception concerne notre capacité à percevoir et à utiliser des informations sur l'accélération d'un objet en mouvement (e.g., Benguigui, Ripoll & Broderick, 2003). En effet, la majeure partie des mouvements observables sur Terre sont soient accélérés soient décélérés et ceci sous l'effet de différents facteurs comme la gravité, la résistance de l'air, les frottements du sol, la force transmise par un individu, etc. Pourtant, la plupart des études menées sur ce sujet ont montré que l'être humain a de grandes difficultés pour prendre en compte et utiliser les informations concernant les accélérations des objets (e.g., Werkhoven, Snippe & Toet, 1992). Malgré cela, nos actions d'interception sont le plus souvent réussies.

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes donc intéressés aux informations utilisées par l'être humain pour réussir de telles actions malgré cette difficulté. Nous avons notamment cherché à déterminer si l'être humain pouvait utiliser comme cela a pu être récemment démontré un modèle interne de la gravité. En effet, dans le cadre des théories cognitives, certains travaux postulent que la gravité est intégrée par l'intermédiaire d'un modèle interne de la gravité permettant de déterminer le TTC d'un objet en chute libre et par conséquent accéléré par la gravité (e.g., McIntyre, Zago, Berthoz & Lacquaniti, 2001a). Ce modèle

interne permettrait de surmonter les difficultés du système visuel à percevoir l'accélération d'un objet. Plus besoin de mesurer l'accélération de l'objet, nous la connaissons !

Au contraire, les théories écologiques postulent pour leur part que l'être humain ne recourt pas à ce genre de représentation, mais plutôt met en place des stratégies permettant de compenser l'absence de détection de la gravité, par l'utilisation de stratégies de couplage continu entre le mouvement de la balle à intercepter et l'effecteur.

Pour essayer de répondre à la question de la possible utilisation d'un modèle interne de la gravité, nous avons mené sept expérimentations ainsi que trois expérimentations contrôles utilisant trois paradigmes différents. Le premier paradigme repose sur des tâches de jugement perceptif. Nous montrerons dans ce chapitre que si la gravité est bien prise en compte dans nos jugements, son utilisation n'est que partielle et qualitative. Le deuxième paradigme concerne les actions d'interception indirecte qui consistent à intercepter un mobile en propulsant un effecteur qui se déplace ensuite par lui-même. Ces tâches ne permettent pas de régulation et nécessitent de produire une action sur la base d'une prédiction (Benguigui et al., 2003). Les expérimentations conduites dans ce paradigme tendront à montrer que les actions d'interception ne se font pas nécessairement sur la base d'informations de distance ne donnant pas accès au TTC. Néanmoins, ces expériences montreront qu'un modèle interne de la gravité ou des informations optiques rendant compte de TTC1 sont également utilisées par certains participants. Enfin, les résultats du troisième paradigme qui repose sur des interceptions directes (permettant la régulation) démontreront que la gravité n'est pas prise en compte quantitativement pour intercepter un objet en chute libre, mais influence nos actions sous la forme d'une connaissance implicite qualitative de la physique.

Pris ensembles, ces résultats permettront de rejeter l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité (c'est-à-dire, permettant une prédiction précise du TTC), mais

montreront néanmoins qu'une prédiction qualitative est possible. Cette conclusion permettra de proposer de nouvelles pistes pour des travaux futurs dans lesquelles couplages information-mouvement et connaissances a priori sur la trajectoire peuvent être envisagés comme complémentaires.

Cadre théorique

Chapitre 1 : Cadre théorique

1.1 Rappel historique des théories dans les actions d'interception

Dans le domaine du contrôle moteur et de la perception, deux champs théoriques opposés cherchent à expliquer les performances humaines. D'un coté, les théories cognitives ou computationnelles pour lesquelles l'information présente dans l'environnement est pauvre et doit être enrichie par des traitements de haut niveau ou des modèles internes pour devenir exploitable (e.g., Wolpert & Flanagan, 2001 ; Wolpert, Ghahramani & Flanagan, 2001 ; Davidson & Wolpert, 2003). D'un point de vue computationnel, le cerveau agit comme un système de traitement qui transforme ou enrichit des entrées sensorielles en sorties motrices, verbales ou autres, et le contrôle moteur peut être décrit comme le processus de transformation de ces entrées sensorielles (perçues ou recherchées) en une action motrice adaptée produite par un programme moteur.

A l'opposé, la théorie de la perception directe développée par Gibson (1966 ; 1979), dite « approche écologique », énonce qu'il existe une relation univoque entre le mouvement produit et l'information perçue en terme de flux continu au niveau des capteurs sensoriels. Ainsi le recours aux inférences, c'est-à-dire à un enrichissement de l'information comme cela est proposé par les théories cognitives, n'est plus nécessaire. Le mouvement est contrôlé grâce à l'utilisation de lois de contrôle (Warren, 1988), correspondant à une relation fonctionnelle entre l'information et le mouvement de la forme $\Delta F_{int} = K\ (\Delta Information)$, dans laquelle ΔF_{int} correspond au changement de force produit par l'individu, K est une constante et $\Delta Information$ représente le changement d'information.

Depuis trente ans, un nombre important de recherches portant sur les actions d'interception a été publié, prolongeant l'affrontement entre ces deux grands champs théoriques. Cet intérêt est certainement dû au caractère particulier des actions d'interception, qui illustrent l'utilisation des mouvements complexes coordonnés avec des objets en mouvement dans l'environnement, et qui sont l'expression de fonctions fortement adaptatives

chez l'homme. En effet, les actions d'interception requièrent une réponse motrice extrêmement précise, les contraintes spatiotemporelles pouvant être de l'ordre de 8 cm^3 et ± 2.5 ms en baseball par exemple (Regan, 1992, 1997 ; Regan et al., 1998). De nombreuses études se sont intéressées aux informations utilisées permettant d'atteindre un si haut degré de précision dans nos actions d'interception. En particulier, la capacité des êtres humains à utiliser une information portant sur l'accélération de la balle à intercepter concentre, depuis quelques années, un nombre croissant d'études (e.g., Rosenbaum, 1975 ; Babler & Dannemiller, 1993 ; Benguigui, Ripoll & Broderick, 2003).

Une des premières théories computationnelles sur les actions d'interception a été celle du timing opérationnel de Tydesley et Whiting (1975). Partant de l'idée de Schmidt (1968) selon laquelle les actions d'interception nécessitent deux anticipations, une du système perceptif et l'autre du système moteur pour coïncider avec l'arrivée de l'objet, cette théorie suggère que la réduction de la variabilité temporelle du geste moteur, résultant de la pratique et de l'apprentissage, permet de réduire le problème de l'interception à l'initiation de l'action à un seuil spécifique de TTC. L'attention a donc été portée sur les variables informationnelles susceptibles de donner accès au TTC. Il a été suggéré que le TTC permettant de programmer au plan temporel l'action est reconstruite sur la base d'opérations complexes, partant de la capture séquentielle d'indices de position de l'objet sur la rétine et de récepteurs proprioceptifs des muscles extra-oculaires. Ainsi, le TTC d'un objet se déplaçant à vitesse constante sur une ligne droite pourrait être calculé par :

$$TTC = -\frac{x}{\dot{x}} \qquad (1)$$

où x représente la distance entre l'objet et le point d'interception et $\dot{x}$ est la vitesse de l'objet. Lorsque l'objet se déplace avec une accélération constante, le TTC peut être calculé par :

$$TTC = -\frac{\dot{x} - \sqrt{\dot{x}^2 - 2\ddot{x}x}}{\ddot{x}} \quad (2)$$

où $\ddot{x}$ représente l'accélération de l'objet.

Cependant, la stratégie du timing opérationnel a été fortement critiquée du fait de plusieurs observations. Premièrement, un grand nombre d'études ont montré que le temps de mouvement n'est pas invariant, mais dépend de différents facteurs tels que la taille et la vitesse de la cible ou la précision temporelle requise (e.g., Bootsma & van Wieringen, 1990 ; Tresilian, 2004, 2005). De plus, Bootsma et van Wieringen (1990) ont montré que les experts en tennis de table, lors de la frappe de la balle, font preuve d'une plus grande variabilité temporelle dans le déclenchement de la phase de propulsion que dans le moment de contact entre la balle et la raquette. Cette observation est clairement opposée à l'hypothèse du timing opérationnel. En effet, si le mouvement était contrôlé exclusivement sur un mode prescriptif, c'est-à-dire entièrement programmé avant l'initiation du geste et ne permettant pas de modification du mouvement en cours d'exécution, la variabilité au moment du contact devrait être au mieux égale à celle du déclenchement du geste. Il semble ainsi que le contrôle des actions d'interception ne puisse pas être résumé au seul contrôle du moment d'initiation du mouvement. Enfin, la perception exacte du TTC dans cette théorie exige la perception d'informations sur la distance, la vitesse et l'accélération de l'objet en mouvement. Or, des études antérieures ont montré que les humains jugent très mal la distance absolue d'objets éloignés de plus de quelques mètres (Collewijn & Erkelens, 1990), ainsi que leur accélération. Cette dernière observation a d'ailleurs été confirmée par le résultat de nombreuses études, montrant que le système visuel humain détecte et mesure faiblement l'accélération des objets (Werkhoven, Snippe & Toet, 1992 ; Hecht, Kaiser & Banks, 1996 ; Brouwer, Brenner & Smeets, 2002b ; Benguigui et al., 2003 ; Watamaniuk & Heinen, 2003). Selon Babler et Dannemiller (1993), l'accélération d'un objet ne serait détectable que si le taux de

changement de vitesse, appelé V_{ratio} (Calderone & Kaiser, 1989) dépasse un seuil de 20 à 25%.

A l'opposé, et d'un point de vue écologique, Lee (1976) a proposé qu'une information optique appelée tau ($\tau(\theta)$, l'inverse du taux d'expansion de l'angle θ formé par l'objet au point d'observation), issue d'une fonction utilisée traditionnellement en physique pour traduire le rapport entre une quantité et sa variation au cours du temps, pouvait être utilisée pour déterminer le TTC. Suivant Lee (1976), de nombreux auteurs ont montré des résultats compatibles avec l'utilisation de $\tau(\theta)$ (e.g., Bootsma & van Wieringen, 1990 ; Savelsbergh, Whiting & Bootsma, 1991 ; Savelsbergh, Whiting, Pijpers & van Santvoord, 1993) ou $\tau(\theta,\varphi)$ (cf. Bootsma & Oudejans, 1993, pour une version généralisée de τ utilisable dans des situations où le mobile n'approche pas de manière directe vers le point d'observation). La perception et l'utilisation de $\tau(\theta)$ ont souvent été présentées comme un exemple typique de la théorie écologique, car l'information nécessaire est présente dans l'environnement sans avoir besoin de recourir à des traitements de haut niveau ou des représentations internes.

Cependant, l'utilisation de tau a été elle aussi soumise à un certain nombre de restrictions. Par exemple, l'information donnée par $\tau(\theta)$ ne donne une estimation exacte de TTC que si l'objet est rigide, formant un angle réduit au point d'observation. Selon Gray et Regan (1998), si l'angle formé par l'objet au point d'observation est trop important, une erreur dans l'estimation proportionnelle à cet angle sera commise. Cette erreur est approximativement de 1% pour un angle de 10°, 1.5% pour un angle de 20° et de 5.4% pour un angle de 30°. De plus, l'objet ne doit pas tourner sur lui-même sauf dans certains cas particuliers (un objet sphérique étant un cas particulier ; pour les cas d'objets non sphériques tournant sur eux mêmes, l'expansion de l'objet sur la rétine n'est pas isotropique et différents méridiens de l'objet donnent différents TTC au même moment, voir Regan, 1997 ; Regan &

Gray, 2000). Enfin, une grande faiblesse des études expérimentales testant l'utilisation de $\tau(\theta)$ est de ne pas avoir permis de produire des résultats qui montrent véritablement son utilisation en écartant l'utilisation de sources d'informations alternatives mais qui sont seulement compatibles avec son utilisation. Les seules études où $\tau(\theta)$ a été manipulé avec des balles se dégonflant (Savelsbergh et al., 1991 ; Savelsbergh et al., 1993) n'apportent pas de preuves indiscutables quant à l'utilisation de $\tau(\theta)$.

1.2 Interception d'un objet accéléré

Puisque les êtres humains ne semblent pas percevoir précisément et utiliser l'accélération visuelle, une des questions en suspens concerne la manière dont les actions d'interception sont adaptées aux objets en mouvement dans notre environnement dont le déplacement est le plus souvent accéléré ou décéléré (e.g., Dubrowski & Carnahan, 2000, 2002). Il semble raisonnable, comme le propose Rosenbaum (1975), que les individus adaptés à leur environnement utilisent des stratégies prenant en compte la vitesse non uniforme (accélération ou décélération) des objets en déplacement. De nombreuses recherches se sont donc intéressées aux actions d'interception d'un objet accéléré.

1.2.1 Proposition des théories écologiques

L'utilisation de $\tau(\theta)$ lorsque la vitesse de l'objet n'est pas constante a pu paraître dans un premier temps inadéquate dans la mesure où $\tau(\theta)$ donne accès seulement à TTC1, c'est-à-dire une relation temporelle entre un objet et un observateur basée sur la distance de l'objet et sa vitesse. Dans le domaine temporel, cela implique que les observateurs surestiment le TTC dans le cas d'un objet accéléré, initiant leur mouvement trop tard, et inversement sous-estiment le TTC dans le cas d'un objet décéléré, initiant leur mouvement trop tôt (e.g., Lobjois, Benguigui & Bertsch, 2005).

Il a cependant été proposé que $\tau(\theta)$ soit suffisant si la tâche permet un couplage continu entre les systèmes perceptif et moteur, comme Lee, Young, Reddish, Lough et Clayton (1983) le démontrèrent. Dans cette étude, les participants devaient frapper une balle en chute libre depuis trois hauteurs de chute différentes (3 ; 5 et 7.2 m). Les résultats ont montré que plus le point de départ de la balle était haut, plus le mouvement d'interception était long, comme prédit par une stratégie TTC1. En effet, une même valeur de TTC1 est atteinte pour un TTC plus élevé (plus tôt donc) lorsque la balle chute d'une hauteur plus importante (Figure 1). En conséquence, et pour un même TTC, plus la hauteur de chute est élevée, plus l'initiation du mouvement d'interception devrait avoir lieu tôt, menant ainsi à une durée du mouvement elle aussi plus importante.

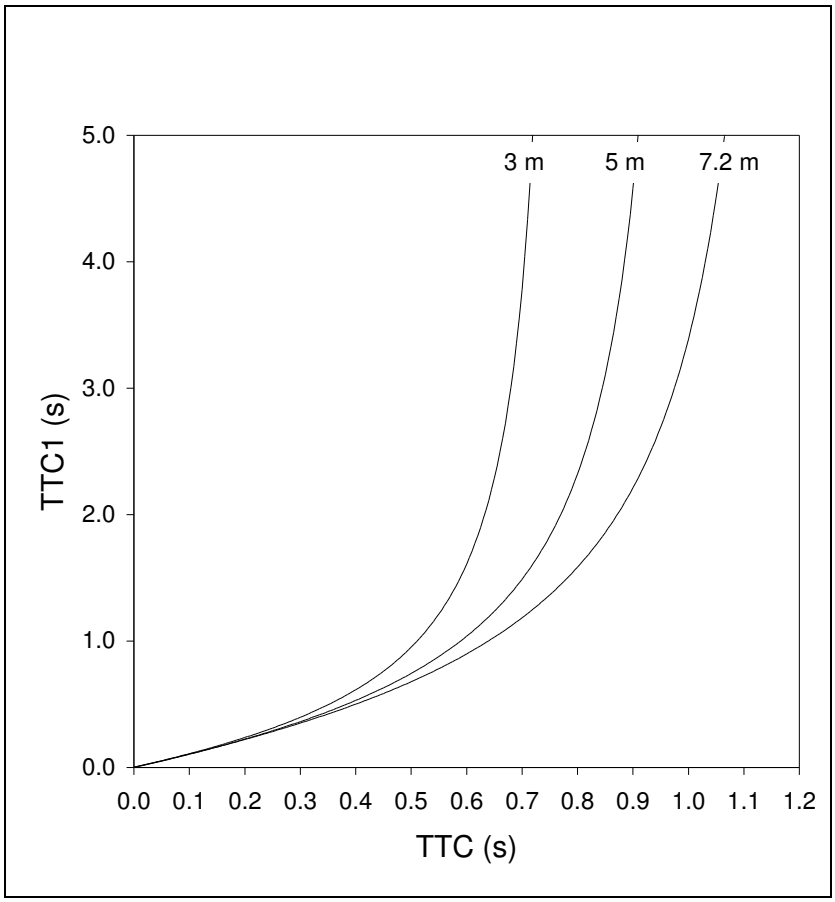


Figure 1 : Evolution de TTC1 en fonction de TTC pour trois hauteurs de chute différentes, d'après Lee et al. (1983). Une même valeur de TTC1 est atteinte pour un TTC plus élevé lorsque la hauteur de chute est importante.

L'hypothèse de l'utilisation de $\tau(\theta)$ a aussi été confortée par l'observation de Lee et al. (1983) montrant que l'évolution des angles du genou et du coude correspondait à celle prédite sur la base d'une utilisation de TTC1 et non pas sur la base de TTC.

En utilisant une tâche d'interception virtuelle sur un écran d'ordinateur, Port, Lee, Dassonville et Georgopoulos (1997) ont étudié la capacité des individus à intercepter des objets se déplaçant selon des vitesses pouvant être constantes ou non. La tâche consistait à intercepter avec un curseur un objet se déplaçant sur un écran. Le stimulus se déplaçait aléatoirement en accélérant, à vitesse constante ou en décélérant. Sous ces différentes conditions, seuls 41.3% des essais étaient réussis (compris dans une erreur de 0 ms ±100)[1]. La grande majorité des erreurs en avance ont été produites dans la condition de décélération, alors que la grande majorité des erreurs en retard ont été produites dans la condition d'accélération. Ces résultats, conformes à ceux trouvés par Ripoll et Latiri (1997) dans une tâche d'anticipation coïncidence, révèlent la difficulté à prendre en compte l'accélération d'un objet pour la synchronisation de la réponse. Ces résultats suggèrent que l'accélération n'est pas directement prélevée, et qu'une régulation continue du mouvement ne compense pas entièrement l'effet de l'accélération dans des tâches peu ou pas pratiquées.

Dans une seconde étude utilisant la même tâche, Lee, Port et Georgopoulos (1997) ont montré que les différents pics de vitesse du mouvement du curseur se produisaient particulièrement lorsque le mouvement du stimulus était accéléré ou décéléré. Les auteurs proposèrent que les différents pics de vitesse correspondent à la production de sous-mouvements permettant d'adapter l'action aux caractéristiques du stimulus, en se basant sur une estimation de premier ordre de la position et de la vitesse de la cible à la fin de chaque sous-mouvement. Cela signifierait qu'aucune information sur l'accélération du stimulus ne serait utilisée dans la production des sous-mouvements.

[1] Dans l'ensemble de ce document, un résultat présenté sous la forme XX ±YY indiquera la moyenne d'un résultat ± son écart type.

Cette conclusion a été confirmée par Benguigui et al. (2003) avec l'utilisation d'un autre paradigme. Dans cette expérience, les participants devaient lancer un projectile sur un support pour intercepter un mobile accélérant, décélérant ou à vitesse constante en un point d'interception librement choisi. Puisqu'aucune régulation du mouvement de l'intercepteur n'était possible une fois celui-ci lancé, l'erreur commise reflétait directement l'information utilisée pour initier le mouvement. Les résultats ont montré que les participants n'utilisaient pas d'information sur l'accélération ou la décélération du mobile mais commettaient des erreurs correspondant précisément à l'utilisation de TTC1 sur un mode prédictif.

Les théories écologiques proposent donc que l'interception d'un objet accéléré soit réalisée grâce à un couplage continu entre le système perceptif et le système moteur. Ce couplage permettrait de compenser l'estimation approximative du TTC obtenue par le système perceptif. Cependant, une des critiques principales adressées aux théories écologiques est de ne considérer que l'information présente dans l'environnement comme étant utilisée pour intercepter un objet, sans prendre en compte une partie des stratégies et informations potentiellement utilisables qui ne seraient pas directement présentes dans l'environnement. Par exemple, de Lussanet, Smeets et Brenner (2001 ; 2002) ont montré qu'un mouvement d'interception est influencé par les caractéristiques des essais précédents, et ainsi que la réalisation de deux essais identiques donnera lieu à deux mouvements différents selon le contexte de la tâche. Hayhoe, Mennie, Sullivan et Gorgos (2005) ont montré pour leur part que les individus prédisent et anticipent le mouvement d'une balle devant être interceptée après avoir rebondi sur la base d'un modèle interne de l'environnement, et notamment des propriétés d'élasticité de la balle. Certaines informations autres que celles présentes dans l'environnement peuvent donc être utilisées pour intercepter une balle. Il est

donc important de considérer quelles autres informations pourraient être utilisées pour intercepter une balle qui accélère.

1.2.2 Les théories computationnelles et l'internalisation de la gravité

Une autre hypothèse permettant d'expliquer le succès dans les tâches d'interception malgré l'accélération de l'objet a été avancée par les chercheurs s'inscrivant dans le cadre des théories computationnelles. Ainsi, de nombreuses études se sont intéressées récemment à une accélération spécifique, l'accélération gravitaire. Pour expliquer le succès des individus dans des tâches d'interception d'objets accélérés par la gravité, malgré sa faible détection par le système visuel, il a été proposé que celle-ci soit directement intériorisée dans un modèle interne de la gravité. Partant de l'idée selon laquelle l'environnement dans lequel nous vivons présente de nombreux invariants auxquels nous pourrions être accoutumés, au point d'incorporer directement leurs effets sans plus devoir les détecter, Shepard (1989) suggère que « nous interprétons et prévoyons des événements significatifs au moyen d'un système qui a internalisé les contraintes durables qui régissent de tels événements dans le monde »[2] (Shepard, 1989 cité par Georgopoulos, 2004 ; Lacquaniti & Zago, 2001a). La gravité (g) est évidemment une de ces contraintes majeures et durables (Morey-Holton, 2003 ; Volkmann & Baluška, 2006). On peut en effet noter que la gravité est incorporée à plusieurs niveaux. Au niveau morphologique (Graf, De Waele, & Vidal, 1995), la gravité a induit une asymétrie corporelle haut-bas dans notre corps, alors que celui-ci est symétrique par rapport à un axe sagittal. En conséquence, le bas de notre corps est prioritairement réservé pour l'appareil locomoteur, tandis que le haut contient nos systèmes d'orientation et de planification (le cerveau). Les récepteurs vestibulaires que sont l'utricule et le saccule, contenant les otolites, sont d'ailleurs spécialement dédiés à la détection et au traitement de l'orientation de la tête par

[2] "We interpret and anticipate significant events by means of a system that has internalized the enduring constraints that govern such events in the world" (Shepard, 1989 cité par Georgopoulos, 2004, p1455).

rapport à la gravité (Minor, 1998 ; Peusner, 2001). Une autre asymétrie fonctionnelle due à la gravité au niveau perceptif est une asymétrie verticale montrée dans le nystagmus optocinétique (Clément, Vieville, Lestienne, & Berthoz, 1986).

En réponse à cette permanence de la gravité, les mammifères terrestres bipèdes que sont les humains ont développé une série de réflexes posturaux tenant compte de g pour maintenir la stabilité posturale (Roll et al., 1993 ; Roll et al., 1998) ; tandis qu'au niveau des mouvements des yeux, l'absence de gravité a pour conséquence de diminuer la fréquence, la précision et la vitesse des poursuites visuelles, et d'augmenter le temps nécessaire pour fixer le regard sur une cible chez les cosmonautes (Kornilova, 2004 ; Kornilova et al., 2004). La sensibilité du système nerveux central aux conséquences visuelles de la gravité apparaitrait très tôt, dès les 6 premiers mois, et se construirait lentement pour se terminer vers l'âge de 6 ans d'après Kim et Spelke (1992, 1999). Utilisant plusieurs méthodes d'analyse, ces auteurs ont montré que les enfants jugent plus naturels et familiers les mouvements d'objets lorsque ceux-ci sont cohérents avec les effets de la gravité.

Au plan physique, la conséquence la plus évidente de la gravité est d'accélérer tout objet en chute libre, d'une valeur quasi constante (environ 9.81 m/s² au niveau de la mer, avec une variation inférieure à 1% en changeant d'altitude ou de latitude (Zago & Lacquaniti, 2005b)). McIntyre, Berthoz et Lacquaniti (1998) puis McIntyre, Zago, Berthoz et Lacquaniti (2001a) ont proposé que cette constance de la valeur de g permette sa prise en compte dans les actions d'interception par l'intermédiaire d'un modèle interne de la gravité. D'après Zago & Lacquaniti (2005c), « puisque le mouvement d'un objet obéit aux lois de la mécanique, il devrait être hautement prévisible par le cerveau »[3], plus besoin donc de mesurer visuellement l'accélération d'un objet qui chute, il suffit d'avoir intégré la constance gravitaire et d'élaborer un modèle interne de la chute.

[3] "Because object motion obeys the laws of mechanics, it should be highly predictable by the brain." (Zago & Lacquaniti, 2005c, p179).

Ce modèle correspond à un modèle direct du contrôle moteur c'est-à-dire un modèle interne qui peut prédire l'état prochain d'un système (Wolpert et al., 2001). Un modèle direct de l'environnement pourrait donc permettre de prédire l'état suivant d'une balle en chute libre en combinant à la fois des informations visuelles en temps réel sur la position et la vitesse de l'objet avec une représentation interne de la gravité (Davidson & Wolpert, 2005). L'utilisation d'un modèle interne de la gravité présenterait donc l'avantage de combler la difficulté ou l'impossibilité du système visuel à percevoir l'accélération d'un objet (Werkhoven et al., 1992 ; Watamaniuk & Heinen, 2003) et permettrait donc d'accéder au TTC exact d'un objet en chute libre.

Cette hypothèse a reçu le soutien de données comportementales et neurophysiologiques, qui seront présentées ici dans un premier temps. Puis, dans un second temps, nous tenterons de montrer que certaines questions concernant l'utilisation de ce modèle interne n'ont pas été posées correctement, et qu'un modèle interne de la gravité ne pourrait jouer qu'un rôle limité dans les actions d'interception. Ainsi, nous proposerons une version alternative permettant d'envisager qu'une connaissance qualitative et implicite des effets de la gravité dans les actions d'interception puisse être utilisée pour faciliter l'interception d'objet en chute libre, au lieu d'un modèle interne quantitatif de la gravité comme proposé par Zago et al. (2004).

1.2.3. Preuves expérimentales de l'internalisation de la gravité

1.2.3.1. Les tâches de jugement perceptif

C'est un fait bien connu que la perception visuelle de la cinématique d'un objet en déplacement (trajectoire, vitesse, etc.) peut spécifier les propriétés dynamiques de cet objet (masse, forces, etc. (e.g., Jacobs, Runeson & Michaels, 2001), c'est-à-dire l'ensemble des forces causant et s'opposant au mouvement). Certains auteurs (e.g., Runeson, Juslin & Olsson,

2000) interprètent la perception visuelle de la dynamique de l'évènement comme une illustration de la théorie de la perception directe de Gibson (1979) car selon eux la cinématique de l'objet spécifie directement ces informations, alors que d'autres (e.g., Gilden, 1991) le voient comme le résultat d'inférences heuristiques permettant d'interpréter l'évènement visuel (e.g., lors d'une collision, l'objet le plus léger rebondira plus rapidement).

Lorsqu'on demande d'indiquer la position finale d'un objet en mouvement après sa disparition, la position finale indiquée est décalée dans le sens du mouvement. Ce décalage est appelé moment représentationnel et correspond à un biais de la mémorisation spatiale de la position finale de la cible (Freyd & Finke, 1984). Il apparaît que ce décalage est plus important lorsque le déplacement est vertical et orienté vers le bas que lorsqu'il est orienté vers le haut, et qu'un décalage vers le bas est aussi présent lorsque la trajectoire est horizontale. Ceci est généralement interprété comme un effet d'une représentation de la gravité qui biaiserait notre mémoire spatiale (Hubbard, 1995), appelé gravité représentationnelle. Cela signifierait que, malgré la difficulté à percevoir visuellement l'accélération d'un objet, les effets de l'accélération gravitaire seraient directement pris en compte dans les jugements de la position finale d'un objet disparaissant soudainement. En d'autres termes, bien que visuellement non détectés, les effets de la gravité seraient intégrés dans nos jugements perceptifs, et appliqués à la stimulation visuelle à juger alors même que celle-ci est virtuelle (e.g., Hubbard, 1995) et, de ce fait, non soumise à la gravité.

1.2.3.2 Les tâches d'interception

L'hypothèse de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité dans les actions d'interception a été testée dans un grand nombre d'études depuis les travaux princeps de Lacquaniti et Maioli (1989a & b). Dans une première expérience, Lacquaniti et Maioli (1989a) ont montré que la synchronisation anticipée de l'EMG des muscles du poignet et du coude se produisait toujours au même moment (e.g., pour le biceps 150 ms avant le contact,

voir figure 2) indépendamment de la hauteur de chute initiale de la balle (point de départ de 0.2 à 1.6 m).

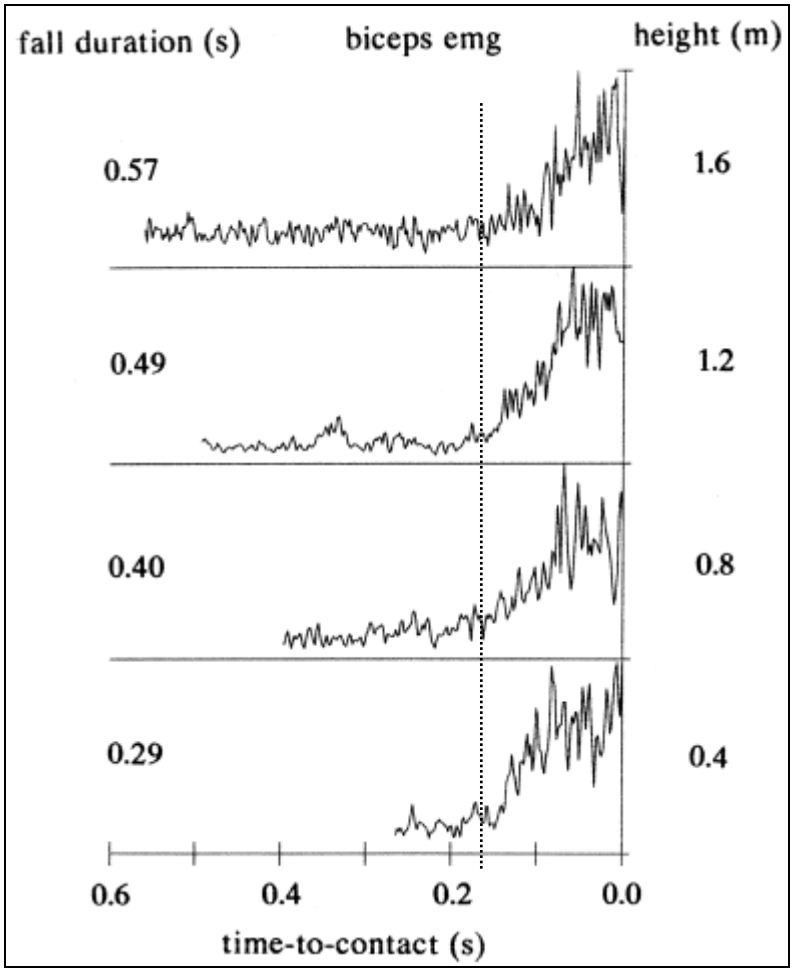


Figure 2 : : activité EMG anticipée du biceps avant le contact avec la balle, d'après Lacquaniti et Maioli, 1989a. L'activité EMG débute à un temps constant de 150 ms avant le contact (ligne hachurée).

Selon Lacquaniti et Maioli (1989a), l'occurrence de pics d'activation EMG à un TTC constant suggère que la synchronisation motrice (spécifiquement, l'initiation de la commande motrice) puisse être basée sur TTCg (c'est-à-dire, le TTC exact pour un objet en chute libre et obtenu à partir d'un modèle interne de la gravité). En effet, selon Lacquaniti et Maioli (1989a), si les participants avaient produit leur réponse sur la base d'une valeur constante de

TTC1 obtenue par exemple d'une information de premier ordre comme $\tau(\theta)$[4], comme cela est proposé par Lee et al. (1983), alors le TTC au moment du pic d'EMG n'aurait pas été constant lorsque la hauteur de chute varie.

Dans une deuxième expérience utilisant la même tâche, Lacquaniti et Maioli (1989b) ont montré que les participants étaient capables de synchroniser la fermeture de leur main sur la balle en chute sans la voir, à condition de connaître au préalable sa hauteur de chute et qu'un signal auditif indique son départ. Ce résultat a été interprété comme une preuve de la mémorisation de la valeur spécifique de l'accélération gravitaire et de son utilisation pour prédire le TTC de la balle en chute libre.

Plus récemment, l'utilisation d'un modèle interne de la gravité a été testée durant une mission spatiale (McIntyre et al., 2001a). Dans cette étude, des astronautes effectuaient une tâche d'interception de balle « en chute » en condition « 1g » (sur Terre) et « 0g » (dans l'espace). La balle était projetée vers le bas (par rapport à l'environnement visuel dans la condition 0g) avec trois vitesses initiales (0.7 ; 1.7 et 2.7 m/s) d'un point de départ situé 1.6 m au dessus de leur main (Figure 3).

[4] $\tau(\theta)$ était considéré à cette époque comme la source principale d'information sur le timing des actions d'interception.

Figure 3 : Photographie du dispositif expérimental utilisé par McIntyre et al. (2001a) lors de la mission spatiale. La main de l'astronaute est située sous le canon d'où est éjectée une balle chutant à 0g devant être interceptée[5].

Dans la condition 1g, les réponses anticipées du bras (faible rotation du bras et pic EMG du biceps) étaient bien synchronisées avec l'arrivée de la balle, indépendamment de sa vitesse initiale, confirmant les résultats antérieurs de Lacquaniti et Maioli (1989a & b). Dans la condition 0g, les réponses anticipées apparaissaient plus tôt (par rapport au moment d'impact) que dans la condition 1g (i.e., pour un TTC supérieur que dans la condition 1g, figure 4).

[5] Photographie disponible sur :
http://spaceflight.nasa.gov/gallery/images/shuttle/sts-90/hires/90349019.jpg

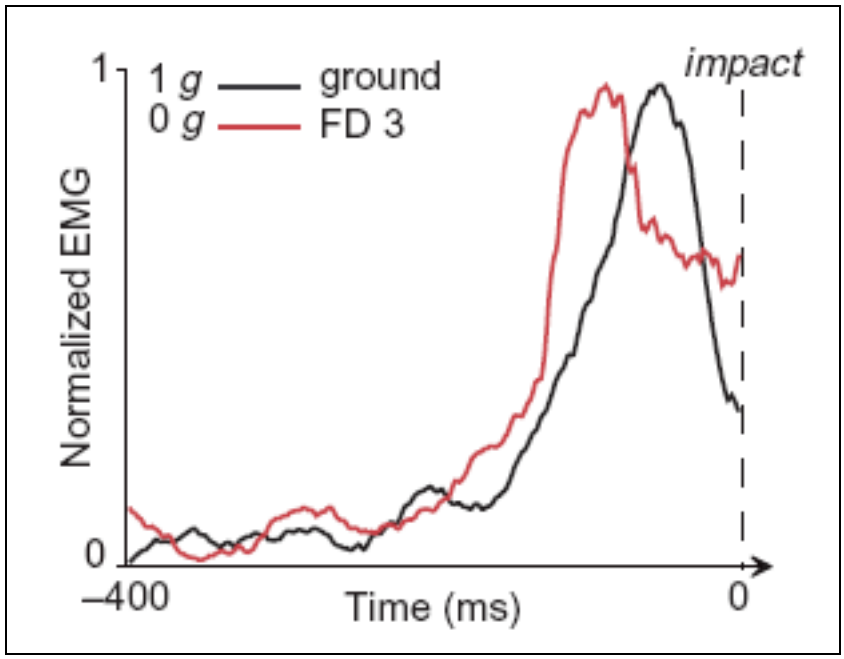


Figure 4 : réponse motrice anticipée du biceps sur Terre (trait noir) et dans l'espace (trait rouge) après trois jours de vol. Dans l'espace, la réponse motrice a lieu environ 30 ms plus tôt que sur Terre (par rapport au moment d'arrivée de la balle), d'après McIntyre et al. (2001a).

Ces résultats ont conduit McIntyre et al. (2001a) à rejeter à la fois (1) un contrôle de la réponse anticipée sur la base de la variable optique $\tau(\theta)$ (dans ce cas, les réponses anticipées auraient toujours du apparaître dans la condition 0g plus tard qu'observées), et (2) la perception directe de l'accélération de la balle (dans ce cas, aucune différence n'aurait du être trouvée entre les conditions 1g et 0g). McIntyre et al. (2001a) en conclurent que le cerveau anticipe l'accélération gravitaire de l'objet se déplaçant visuellement « vers le bas » en utilisant un modèle interne de la gravité terrestre, même dans l'espace alors que la gravité ne s'applique pas à l'objet (ou de façon négligeable, on parle de microgravité).

Utilisant un système virtuel pour simuler les balles en chute libre, Zago et al. (Zago et al., 2004, 2005 ; Zago et Lacquaniti, 2005a) entreprirent une série d'expériences pour examiner la validité du modèle interne de la gravité. Dans ces expériences, la chute d'une balle virtuelle projetée sur un écran était couplée à la chute d'une balle réelle lâchée par un

électro-aimant derrière l'écran. Les deux balles arrivaient en synchronisation au point d'interception, situé juste au-dessous de la limite inférieure de l'écran et les participants devaient frapper la balle réelle lorsque celle-ci arrivait au point d'interception. La balle réelle étant cachée par l'écran, les participants devaient exécuter leur mouvement en utilisant les informations fournies par la balle virtuelle, et notamment son TTC (Figure 5).

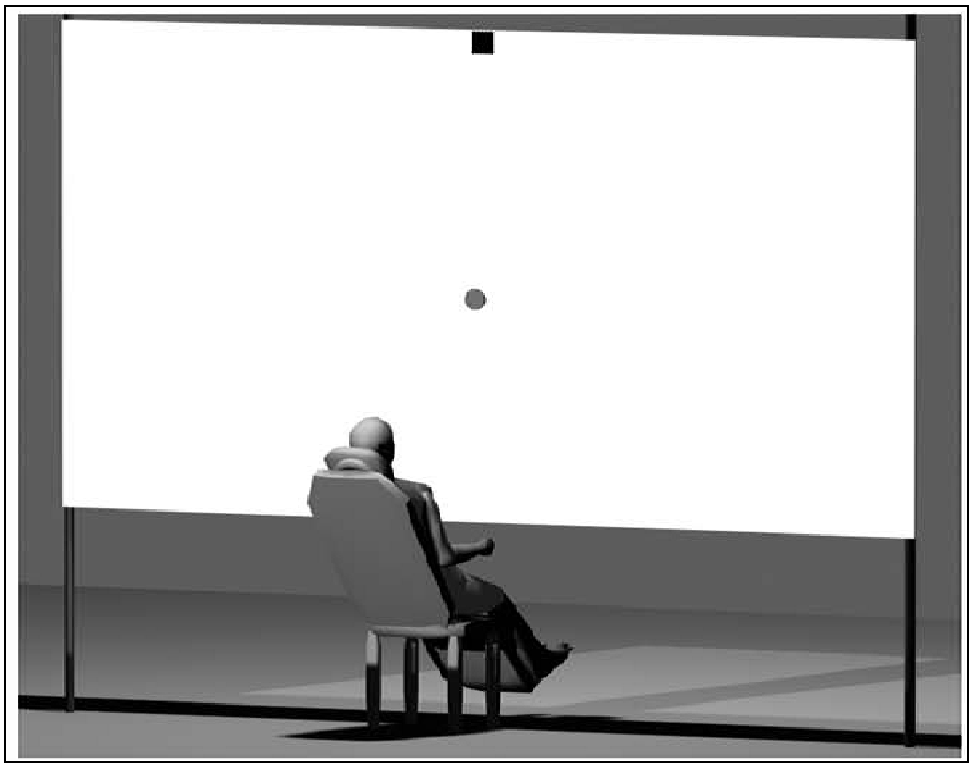


Figure 5 : scène expérimentale utilisée dans Zago et al. (2004, 2005) et Zago et Lacquaniti (2005a). Les participants devaient frapper une balle lâchée derrière l'écran et arrivant au point d'interception en même temps que la balle virtuelle affichée à l'écran.

Dans une première étude, Zago et al. (2004) employèrent une combinaison spécifique de vitesses initiales et d'accélérations (1g et 0g). Ce dispositif permettait à la fois d'intercepter une balle réelle tout en employant des cinématiques impossibles à obtenir sur Terre. Les résultats ont montré une performance initiale élevée lorsque la balle virtuelle chutait à 1g avec une faible amélioration du taux d'interception (taux d'interception de 80 % ±16 aux cinq premiers essais à 92 % ±10 aux cinq derniers essais). En revanche, la

performance initiale était faible lors de l'interception de la balle virtuelle chutant à 0g avec une amélioration élevée du taux d'interception, sans toutefois atteindre les performances obtenues à 1g (taux d'interception de 20 % ±10 aux cinq premiers essais à 59 % ±13 aux cinq derniers essais, Figure 6).

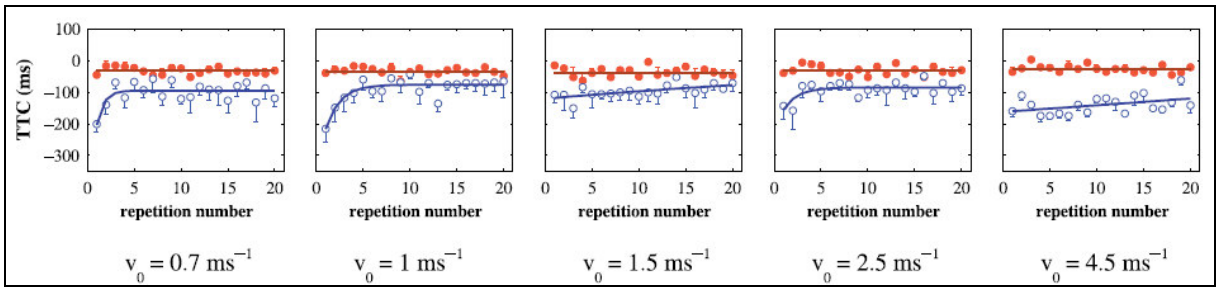


Figure 6 : Résultats obtenus par les participants lorsque la balle accélère à 1g (trait rouge) ou à 0g (trait bleu) selon les différentes vitesses initiales, d'après Zago et al. (2004). Les participants obtiennent de meilleures performances lorsque la balle est soumise à l'accélération gravitaire, preuve pour Zago et al. (2004) de l'internalisation de la gravité.

La vitesse maximale du mouvement, habituellement atteinte au moment d'impact était atteinte plus tôt (par rapport au moment d'impact) dans la condition 0g (vitesse maximale atteinte -93 ms ±78 avant l'impact) que dans la condition 1g (vitesse maximale atteinte -2 ms ±24 avant l'impact). Selon Zago et al. (2004), ces résultats sont la preuve que l'internalisation des lois de Newton dans un modèle interne de la gravité permet une synchronisation parfaite des mouvements d'interception d'une balle en chute libre. Ces auteurs suggèrent néanmoins que l'utilisation d'un modèle interne de la gravité dans des actions d'interception soit dépendante du contexte de la tâche. C'est d'ailleurs ce qu'ils montrent dans une deuxième expérience. Dans cette dernière expérience, les participants devaient uniquement presser un bouton lorsque la balle virtuelle passait sur un point d'interception. La balle virtuelle pouvait adopter les mêmes combinaisons de vitesses initiales et d'accélérations que celles employées dans la première expérience mais aucune balle réelle ne tombait en même temps derrière l'écran. Les résultats indiquent cette fois que les participants réalisent une meilleure

performance lorsque la balle chute à 0g (erreur de synchronisation de 0 ms ±31) plutôt que 1g (21 ms ±40, Figure 7).

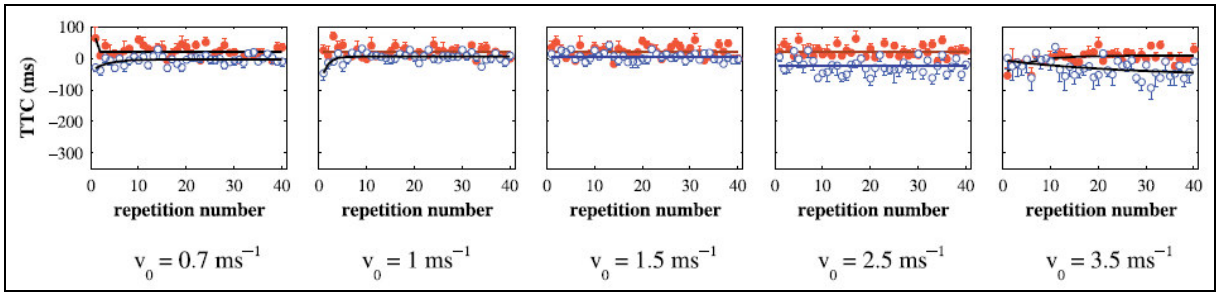


Figure 7 : Résultats obtenus dans la deuxième tâche par les participants lorsque la balle accélère à 1g (trait rouge) ou à 0g (trait bleu) selon les différentes vitesses initiales, d'après Zago et al. (2004). Les participants obtiennent cette fois de meilleures performances lorsque la balle chute à vitesse constante, démontrant que le modèle interne de la gravité est activé selon le contexte de la tâche selon Zago et al. (2004).

Zago et al. (2004) concluent de cette observation que l'activation du modèle 1g dépend du contexte de la tâche : les objets virtuels sont perçus comme sans masse et en conséquence ne sont pas soumis à l'effet de la gravité. De ce fait, les individus emploient un modèle 0g prédisant que la balle chute à vitesse constante afin d'estimer le TTC pour intercepter les balles virtuelles même si celles-ci chutent en accélérant à 1g.

D'autres expériences ont été menées pour étudier les propriétés du modèle interne de la gravité. En particulier, Zago et al. (2005) et Zago et Lacquaniti (2005a) se sont intéressés au comportement des participants interceptant des balles chutant à 0g : la répétition des essais et l'apprentissage qui en découle permettent-ils de développer un nouveau modèle 0g ou d'adapter le modèle interne 1g existant ? En utilisant le même paradigme que Zago et al. (2004) d'une balle réelle à intercepter en synchronisant le mouvement d'interception via une balle virtuelle chutant à 0g, les deux études concluent que les participants ne développent pas de nouveau modèle 0g mais plutôt qu'ils adaptent le modèle 1g, résultat conforme aux

résultats précédents sur l'adaptabilité des modèles internes (Karniel & Mussa-Ivaldi, 2002). Ces deux études ont montré que deux paramètres du modèle 1g peuvent être modulés pour faire face à des trajectoires 0g : $\hat{g}$, l'évaluation interne de la gravité et le λ, le seuil de TTC utilisé pour déclencher le mouvement d'interception. λ est un temps anticipatoire nécessaire pour compenser le délai visuo-moteur et la durée du mouvement d'interception. Les données obtenues démontrent que l'adaptation du modèle 1g à la trajectoire 0g vient d'une diminution de λ plutôt que de $\hat{g}$. Cette réduction de λ peut provenir de deux façons différentes: (1) une diminution des délais de transmission et de traitement central ou (2) une diminution des délais mécaniques, ou les deux. Puisque le mouvement d'interception est balistique, les délais mécaniques étant donc proches de leur valeur minimum, les auteurs concluent en faveur d'une compression des délais de transmission et de traitement central à leur valeur minimum dictée par les contraintes physiologiques.

Pour leur part, Senot, Zago, Lacquaniti et McIntyre (2005) ont examiné dans leur étude l'utilisation d'un modèle interne de la gravité lorsque les individus font face à des informations visuelles et proprioceptives cohérentes ou contradictoires. Dans cette étude, réalisée en environnement virtuel immersif avec un casque de réalité virtuelle, les participants devaient presser un bouton pour initier le mouvement d'un intercepteur afin que celui-ci entre en collision avec une balle à un point d'interception prédéfini. La balle pouvait soit tomber du plafond (condition « dessus ») ou monter du sol (condition « dessous »). Des indices visuels ont été rajoutés pour distinguer le plafond du sol. En outre, les participants regardaient littéralement vers le haut pour intercepter les balles dans la condition « dessus » ou vers le bas pour intercepter les balles dans la condition « dessous », afin d'ajouter des informations proprioceptives contribuant à l'orientation des participants. La balle pouvait adopter une

combinaison de trois vitesses initiales et trois accélérations (-1g ; 0g et 1g) indépendamment de la direction du mouvement[6] (Figure 8).

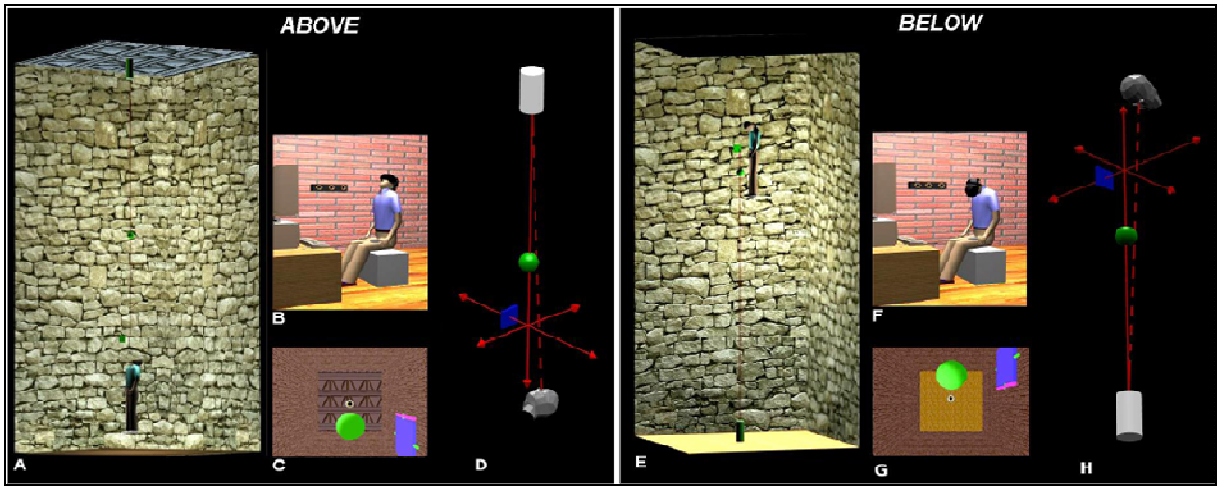


Figure 8 : conditions expérimentales de l'expérience menée par Senot et al. (2005). Les participants devaient regarder une balle chutant du plafond avec la tête levée ou regarder une balle monter du sol avec la tête baissée. La balle pouvait accélérer à -1g, 0g ou 1g.

Les résultats ont montré que le taux d'interception était plus élevé en condition 0g (67%) qu'en condition de balle accélérée (39%) ou qu'en condition de balle décélérée (40%), indépendamment de la direction de mouvement. De manière intéressante, les auteurs ont trouvé une interaction entre les facteurs direction du mouvement et accélération de la balle. Dans la condition -1g, le taux de succès était plus élevé dans la condition « dessous » (44.8%) que dans la condition « dessus » (34.6%). Inversement, le taux de succès dans la condition 1g était plus élevé dans la condition « dessus » (45.6%) que dans la condition « dessous » (32.5%). De plus, la synchronisation de la réponse dans la condition 0g était proche du moment idéal mais significativement plus tôt pour la condition « dessus » (87 ms ±105 avant

[6] Dans l'étude de Senot et al. (2005), g est décrit comme une valeur d'accélération (9.81 m/s²) mais sans être orientée vers le bas comme usuellement. De ce fait 1g × condition "dessus" signifie que la balle accélère en descendant ; 1g × condition "dessous" signifie que la balle accélère en montant ; -1g × condition "dessus" signifie que la balle décélère en descendant ; -1g × condition " dessous " signifie que la balle décélère en montant.

le moment d'impact) que pour la condition « dessous » (62 ms ±102 avant le moment d'impact), indépendamment de l'accélération de la balle. Ce résultat indique une tendance des participants à améliorer leur performance lorsque l'accélération de la balle est cohérente avec la direction du mouvement de la balle et les informations proprioceptives (inclinaison de la tête, Figure 9).

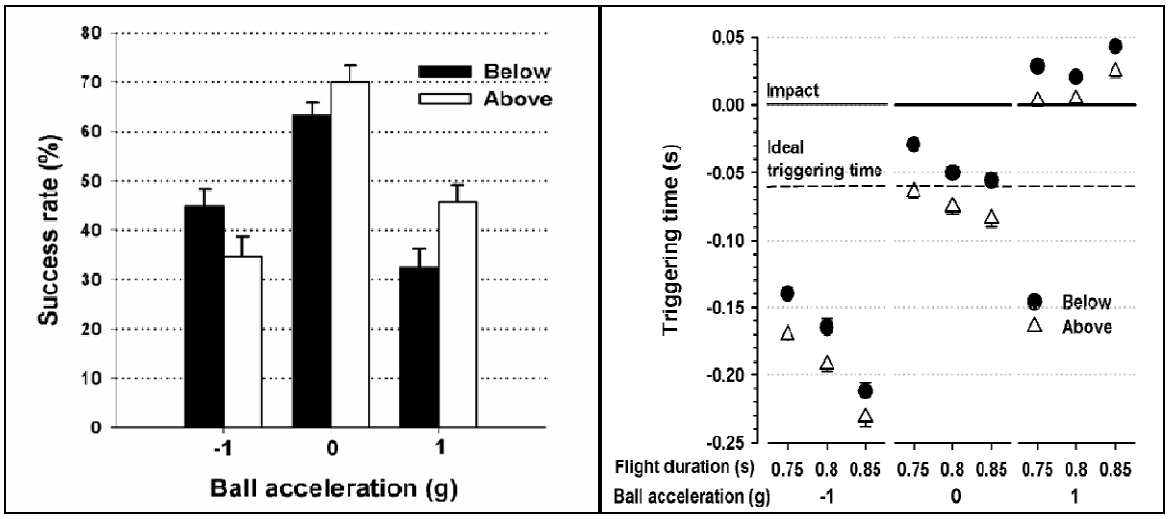


Figure 9 : résultats obtenus par Senot et al. (2005). A gauche : même si les participants ont un meilleur taux d'interception dans la condition 0g que dans les autres conditions d'accélération, les résultats montrent un effet d'interaction entre la direction du mouvement et l'accélération de la balle. A droite : effet de la condition d'accélération, du temps de chute et de la direction du mouvement sur le moment d'initiation. Dans toutes les conditions, l'interception est initiée plus tôt dans la condition dessus par rapport à la condition dessous.

Cette hypothèse a été confirmée dans une expérience contrôle utilisant la même scène visuelle mais dans laquelle les participants maintenaient leur tête droite. Comme dans la première expérience, le taux de succès est plus élevé dans la condition d'accélération 0g que dans les conditions d'accélération 1g et -1g. Cependant, il n'y avait plus comme dans la première expérience d'interaction significative entre la direction du mouvement et l'accélération de la balle (Figure 10).

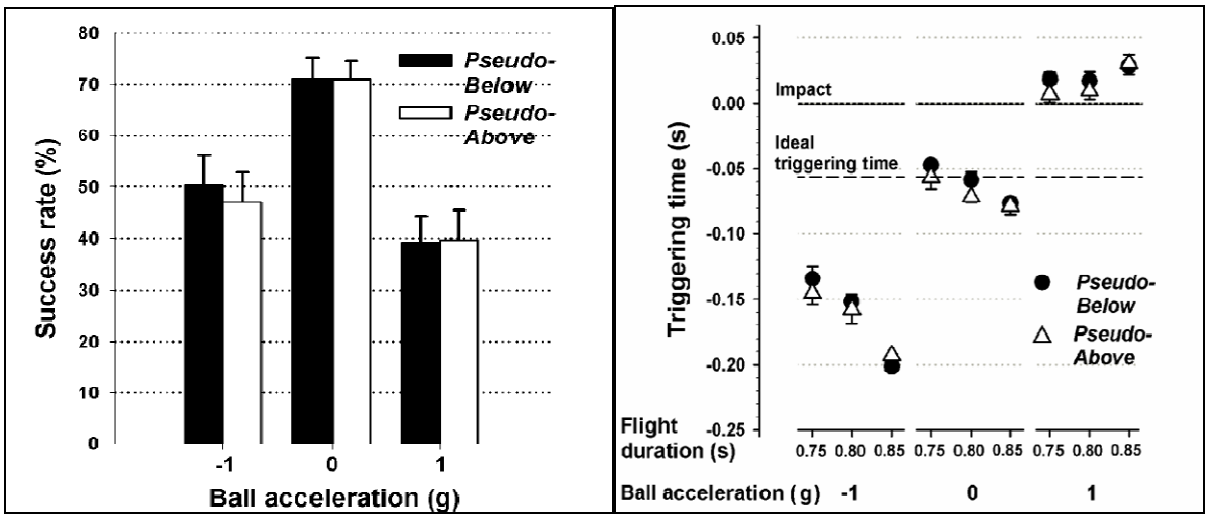


Figure 10 : résultats obtenus par Senot et al. (2005) dans la tâche contrôle. A gauche : encore une fois, les participants ont un meilleur taux d'interception dans la condition 0g que dans les autres conditions d'accélération. Cependant, les résultats ne montrent plus d'effet d'interaction entre la direction du mouvement et l'accélération de la balle. A droite : effet de la condition d'accélération, du temps de chute et de la direction du mouvement sur le moment d'initiation. Il n'y a plus de différence significative dans le moment d'initiation selon la direction du mouvement de la balle.

Senot et al. (2005) concluent qu'un modèle interne de la gravité est employé lorsque les informations visuelles et proprioceptives sont congruentes, menant dans ce cas à des réponses anticipées lorsque la balle se déplace de haut en bas et retardées lorsque la balle se déplace de bas en haut. Cependant, le modèle interne de la gravité n'est pas engagé lorsque les informations visuelles et proprioceptives ne sont pas congruentes.

Enfin, Indovina et al. (2005) entreprirent d'identifier les bases neurales du modèle interne de la gravité en utilisant une expérience d'IRMf. Le protocole expérimental consistait en une balle virtuelle tombant devant un décor (une femme tenant une corbeille sur sa tête, et se tenant devant un bâtiment) rajouté pour mieux représenter la distance parcourue par la balle et fournir plus de réalisme. Cette configuration a été choisie pour éviter que la balle virtuelle ne soit perçue comme sans masse et n'active donc pas le modèle interne de la gravité comme avancé par Zago et al. (2004). La balle pouvait se déplacer avec une accélération de 1g

(conforme à la gravité terrestre) ou -1g (opposée à la gravité terrestre). Dans deux tâches, les participants devaient fixer visuellement un point situé juste au dessus de la tête de la femme, sur la corbeille. Dans des blocs séparés, les participants devaient presser un bouton lorsque la balle virtuelle atteignait le point de fixation (tâche proactive) ou presser un bouton le plus vite possible après que le point de fixation s'agrandisse (Figure 11).

Figure 11 : scène expérimentale utilisée par Indovina et al. (2005). La balle partait de la corbeille placée sur la tête de la femme, montait en haut de l'écran puis redescendait dans la corbeille. Les participants devaient alors presser un bouton à l'arrivée de la balle dans la corbeille ou presser un bouton le plus vite possible après que le point de fixation s'agrandisse.

Dans les deux tâches, le mouvement de la balle couvrait un angle visuel de 14°. La localisation du cortex vestibulaire a été obtenue par stimulation calorique et l'activation de cette aire a été comparée entre les conditions 1g et -1g. Les données ont montré que le cortex vestibulaire, et en particulier l'insula et la jonction temporopariétale étaient activées lorsque l'accélération visuelle correspondait à la gravité dans les deux tâches. Dans la condition -1g,

l'activation cérébrale était significativement plus importante autour du sillon latéral occipital dans les gyri occipital médium et inférieur, une aire connue pour être sensible au mouvement visuel (Orban et al., 2003). Indovina et al. (2005) ont donc conclu que (1) la représentation des lois physiques du mouvement est située dans l'insula et la jonction temporopariétale, aires impliquées dans l'intégration multi-sensorielle et (2) l'activation de ce réseau vestibulaire cortical dépend de la présence visuelle (par le décor) de la gravité terrestre plutôt que de la tâche à réaliser. Ces résultats suggérant une base neurale au modèle interne de la gravité complètent ceux de Merfeld, Zupan et Peterka (1999), ainsi que Angelaki, Shaikh, Green et Dickman (2004) montrant que les noyaux vestibulaires du tronc cérébral et la partie rostrale du noyau fastigial du cervelet ont internalisé la valeur de la gravité et l'utilisent dans un modèle interne des lois de la physique pour désambigüiser les différentes informations leur arrivant, et notamment déterminer si les signaux issus des otholites répondent à une accélération linéaire issue d'un mouvement propre (par exemple ressentie lorsque l'on court) ou à l'accélération gravitaire due à une réorientation de la tête.

1.2.4 Deux modèles internes de la gravité différents pour percevoir ou agir

Cherchant à définir la nature du modèle interne de la gravité, Zago et Lacquaniti (2005c) ont classé cette internalisation utilisée dans les actions d'interception comme une connaissance motrice implicite améliorant les performances dans l'interception d'objets en chute libre. Selon les auteurs, cette forme de connaissance diffère (1) des connaissances explicites (physique naïve) des objets en chute libre dans lesquelles les individus obtiennent de mauvais résultats et (2) des connaissances perceptives implicites qui biaisent notre mémorisation de la position finale d'un objet disparaissant de manière soudaine (gravité représentationnelle, e.g., Hubbard, 1995). Le système moteur établirait donc des représentations internes sur des informations différentes de celles employées par le système

perceptif, permettant l'interception correcte alors que nos connaissances explicites sont erronées et notre perception peut être biaisée (Lacquaniti & Zago, 2001a & b). Il existerait donc un modèle interne de la gravité dans les actions de jugements perceptifs (e.g., Hubbard, 1995), et un modèle interne de la gravité dans nos actions d'interception (e.g., Zago et al., 2004). Ceci montre que des mécanismes différents traiteraient l'information visuelle selon la tâche à accomplir. Cette dichotomie trouve son corrélat neuropsychologique dans le travail de Goodale (e.g., Goodale & Milner, 1992 ; Goodale & Westwood, 2004), suggérant que l'identification perceptive d'un objet est accomplie dans la voie ventrale, alors que les transformations sensorimotrices nécessaires aux actions visuellement guidées sont accomplies dans la voie dorsale.

Pour conclure, les différentes études menées sur le modèle interne de la gravité apportent des arguments forts pour étayer l'hypothèse de l'utilisation de modèles prédictifs dans les actions d'interception. Les preuves expérimentales mentionnées ci-dessus pourraient nous amener à croire que le modèle interne de la gravité est un modèle quantitatif permettant un accès au TTC exact d'un objet en chute libre. Cependant, on peut se demander si certains problèmes méthodologiques et théoriques, développés dans les paragraphes suivants, ne peuvent pas remettre en cause l'existence et l'utilisation effective d'un tel modèle. Dans la partie suivante, nous fournirons des arguments contre l'hypothèse de l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité dans les actions d'interception. Dans un premier temps, nous réexaminerons les études mentionnées dans la première partie, tout particulièrement au plan méthodologique, puis nous fournirons des alternatives pour expliquer les résultats obtenus. Dans un deuxième temps, nous examinerons les limites théoriques d'un modèle interne quantitatif de la gravité.

1.2.5 Limites méthodologiques et interprétations alternatives

L'utilisation d'analyse EMG a permis à Lacquaniti et Maioli (1989b) de montrer que les participants étaient capables de synchroniser un mouvement d'interception avec une balle en chute libre sans contrôle visuel, à la condition de connaître sa hauteur de chute et qu'un signal auditif signale son moment de départ. Ce résultat a été interprété comme une preuve d'une connaissance a priori de la gravité qui permet d'obtenir une estimation du temps de chute. Cependant, cette tâche d'interception peut aussi bien être interprétée comme une tâche de rétention d'intervalle temporel où les participants apprennent le délai séparant deux signaux sensoriels, l'un auditif et l'autre tactile durant les premiers essais, et se construisent une représentation de ce délai par une relation simple entre la hauteur et le temps de chute. Dans ce cas, après apprentissage, les participants n'auraient plus qu'à produire une réponse motrice un certain temps après le signal auditif. Certaines études ont montré que les êtres humains ont une bonne représentation des durées courtes, particulièrement lorsque l'estimation est faite peu de temps après la présentation de l'intervalle temporel (Clément & Droit-Volet, 2006), comme c'était le cas dans l'expérience de Lacquaniti and Maioli (1989b).

Un autre résultat important supportant l'hypothèse d'un modèle interne de la gravité concerne le timing constant de l'activité EMG observé dans les actions d'interception de balle chutant de hauteurs différentes (Lacquaniti & Maioli, 1989a ; Lacquaniti, Carozzo & Borghese, 1993). On peut tout d'abord noter que cette observation n'est pas vérifiée pour tous les muscles. Lacquaniti et al. (1993) ont observé que le moment d'apparition de la réponse EMG anticipée dans les extenseurs du poignet varie selon la hauteur de chute de la balle, comme prédit par l'hypothèse TTC1. Pour les autres muscles, pour lesquels l'initiation du mouvement se fait à TTC constant, une explication alternative est possible. Premièrement, les trois hauteurs de chute les plus faibles (0.2, 0.4 et 0.8 m) sont caractérisées par des temps de présentation très courts (respectivement 202, 286 et 404 ms). Pour les objets chutant sur ces

distances très courtes, il peut être suggéré que l'acteur réagit simplement le plus vite possible pour avoir une chance d'attraper la balle et qu'aucune information sur la cinématique de l'objet, à l'exception du moment de départ, n'est prise en compte. Concernant les deux hauteurs de chute les plus élevées (1.2 et 1.6 m), le temps de présentation (respectivement 495 et 571 ms) semble dans ce cas suffisant pour utiliser la cinématique de la balle. Cependant, il est bien connu depuis Lee et al. (1983) que lorsqu'une balle accélérée s'approche du point d'interception, la différence entre TTC1 et TTC2 (c'est-à-dire la relation temporelle entre un objet et un observateur en se basant sur la vitesse et l'accélération de la balle respectivement) est très faible (Figure 12). Par exemple, dans l'expérience de Lacquaniti et Maioli (1989a), lorsque le TTC est de 150 ms avant contact (i.e., lorsque l'EMG débute), la différence entre TTC1 et TTC2 est de 14 et 24 ms pour une hauteur de chute de 1.6 et 1.2 m respectivement. Cette différence est certainement trop faible pour être détectée par une analyse EMG et l'utilisation d'une variable optique donnant accès à TTC1, même si cela n'est pas démontré, ne peut pas être exclue et pourrait expliquer tout aussi bien le timing de l'EMG de la réponse motrice.

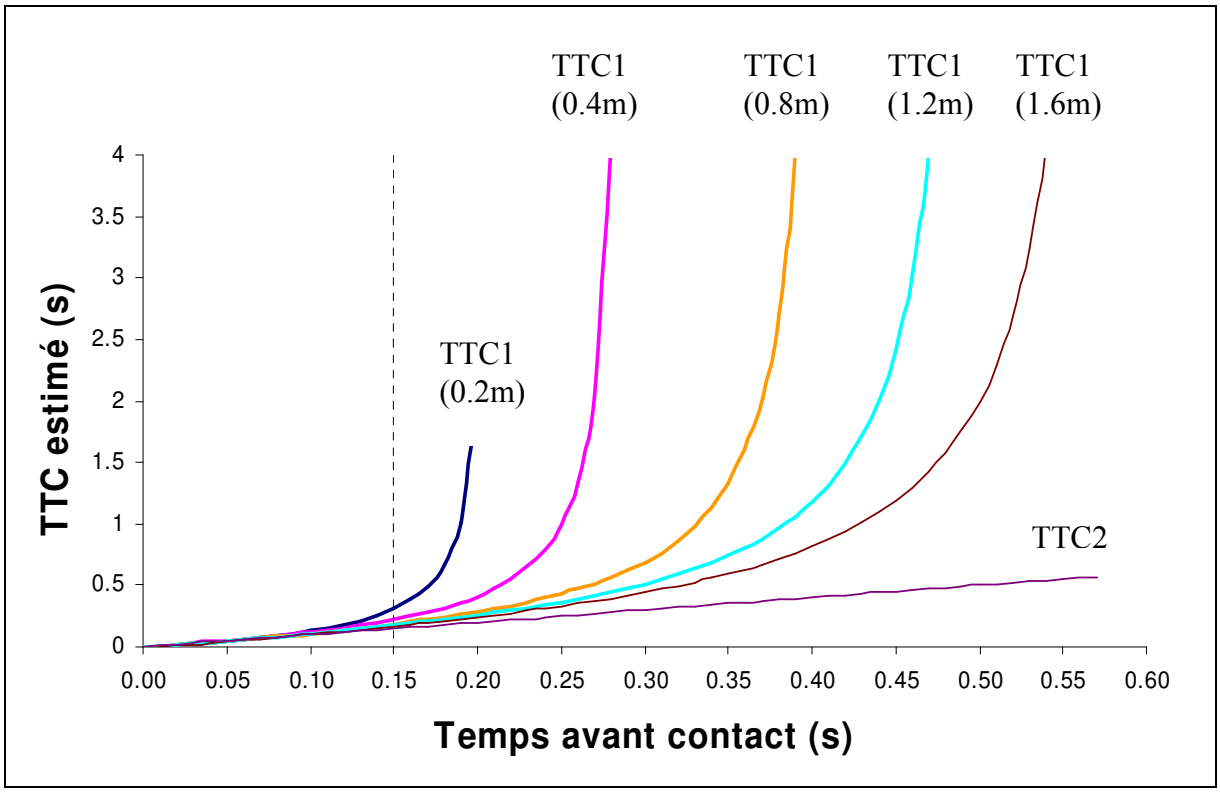


Figure 12 : Evolution de TTC1 en fonction de TTC2 pour cinq hauteurs de chute. 150 ms avant le contact (ligne hachurée), la valeur prise par TTC1 est de 164 ; 174 ; 184 ; 221 et 310 ms pour une hauteur de chute de 1.6 ; 1.2 ; 0.8 ; 0.4 et 0.2 m respectivement. A l'exception des hauteurs de chute les plus courtes, pour lesquelles une stratégie alternative est possible, les valeurs de TTC1 et de TTC2 sont trop proches pour déterminer expérimentalement si TTC1 ou TTC2 est utilisé.

De la même manière, dans l'expérience de McIntyre et al. (2001a), la différence entre les pics d'activité EMG obtenue dans l'espace ou sur Terre est très faible (30 ms environ). L'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité aurait dû mener à des différences dans le timing de la main de 234, 517 et 1781 ms pour une vitesse initiale de 2.7, 1.7 et 0.7 m/s respectivement. En conséquence, ce résultat n'est certainement pas une validation quantitative de l'utilisation de g pour la synchronisation des mouvements d'interception. La différence de 30 ms prouve seulement qu'en l'absence de gravité, les mouvements d'interception sont déclenchés un peu plus tôt (par rapport au moment d'impact) qu'en condition 1g. La conclusion que l'on peut tirer de cette faible différence dans le timing est un effet qualitatif limité de notre connaissance de la gravité modulant le timing des actions

d'interception plutôt qu'une preuve de l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité.

Il est aussi très important de noter que dans cette expérience, les astronautes avaient la main initialement positionnée sur la trajectoire de la balle avant même qu'elle ne parte. En conséquence, les participants ne pouvaient pas manquer la balle, et leur anticipation de 30 ms ne se traduit pas par un feedback d'erreur les forçant à corriger le timing de leur geste. Une tâche dans laquelle la contrainte temporelle aurait été plus forte aurait certainement permis de distinguer plus précisément l'information utilisée. C'est notamment le cas lorsque les participants doivent frapper la balle plutôt que l'attraper. En effet, la contrainte temporelle pour attraper une balle est :

$$TM_{main} \leq TTC_{moment\ d'initiation} + FT/2 \quad (3)$$

dans laquelle TM_{main} est le temps de mouvement de la main, $TTC_{moment\ d'initiation}$ le TTC de la balle au moment au moment d'initiation du mouvement de la main et FT la fenêtre temporelle présentée par la balle au point d'interception. La fenêtre temporelle est la période de temps pendant laquelle l'objet reste dans la zone d'interception, et représente ainsi la précision temporelle requise pour intercepter un objet en mouvement (McLeod, McGlaughlin & Nimmo-Smith, 1985). Il suffit donc que la main arrive au point d'interception avant la balle pour pouvoir l'attraper. Pour frapper la balle, la contrainte temporelle est plus forte car l'acteur doit déplacer sa main au bon moment au bon endroit avec une vitesse particulière. En effet, pour faire entrer la balle en déplacement, il est nécessaire que la main entre en contact avec la balle avec une certaine quantité d'énergie cinétique, ce qui empêche l'acteur d'attendre simplement la balle au point d'interception. Dans ce cas, la contrainte temporelle pour frapper la balle est:

$$TM_{main} = TTC_{moment\ d'initiation} + FT/2 \quad (4)$$

Il faut que la main arrive au point d'interception au même moment que la balle pour pouvoir la frapper. L'utilisation d'une tâche dans laquelle les participants auraient dû frapper la balle aurait augmenté la contrainte temporelle, rendant ainsi la perception du TTC plus critique et aurait peut être permis d'identifier plus clairement l'information utilisée pour générer l'action motrice.

D'autres limites méthodologiques existent dans le paradigme expérimental développé par Zago et al. (Zago et al., 2004, 2005, Zago & Lacquaniti, 2005a). Le dispositif utilisé permettait de manipuler la condition d'accélération (1g contre 0g) tout en utilisant une balle réelle à intercepter pour les deux conditions d'accélération. Bien qu'ingénieux, ce dispositif n'est pas sans biais. En effet, dans ces différentes études, la balle virtuelle et la balle réelle n'ont pas la même vitesse au point d'interception. De ce fait, les deux balles ne présentent pas la même fenêtre temporelle d'interception. La fenêtre temporelle peut être exprimée comme suit :

$$\text{Fenêtre temporelle} = (T_b + T_i) / V_b \quad (5)$$

Où T_b est la taille de la balle, T_i la taille de l'intercepteur et V_b la vitesse de la balle entrant dans la zone d'interception. La fenêtre temporelle peut être considérée comme un indice de difficulté de la tâche (McLeod et al., 1985 ; Tresilian, 2004a & b), qui selon Tresilian et Lonergan (2002), quantifie la contrainte extrinsèque de la précision temporelle requise pour une interception réussie. Parce que cette contrainte importante n'a pas été contrôlée dans leurs expériences, les conclusions avancées par Zago et al. peuvent être remises en cause. Dans leurs expériences, les participants devaient frapper une balle alors que la fenêtre temporelle attendue (correspondant à celle de la balle virtuelle) et la fenêtre temporelle réelle (correspondant à celle de la balle réelle) étaient différentes pour la balle virtuelle à 0g. Ce n'était pas le cas lorsque la balle virtuelle était relâchée avec une accélération de 1g ; la

différence de vitesse entre les balles au point d'interception était faible, et les fenêtres temporelles quasi identiques (Figure 13A). Ceci peut expliquer pourquoi les participants ont très vite atteint une bonne performance dans la synchronisation de leur geste. En revanche, lorsque la balle virtuelle tombait à 0g, la différence entre les vitesses de la balle réelle et de la balle virtuelle au point d'interception était très importante. En conséquence, la fenêtre temporelle attendue et la fenêtre temporelle réelle étaient très différentes (Figure 13B). Par exemple, dans la condition 0g avec une vitesse initiale de 0.7 m/s, l'information donnée par la balle virtuelle induisait une fenêtre temporelle attendue de 214 ms, alors que la fenêtre temporelle réelle est de 24 ms. Une telle différence entre les attentes des participants sur la précision requise dans l'action d'interception sur la base de la balle virtuelle et la précision réellement requise pour intercepter la balle réelle peut expliquer les erreurs importantes dans la réponse des participants dans un certain nombre d'essais. Cette observation nous permet de contester la conclusion de Zago et al. qu'utiliser un modèle interne quantitatif de la gravité permet aux participants d'être précis lorsque la balle chute avec une accélération de 1g mais ne le permet pas lorsque la balle chute à 0g. En effet, les participants ont pu être trompés par la différence entre la fenêtre temporelle de la balle virtuelle et celle de la balle réelle.

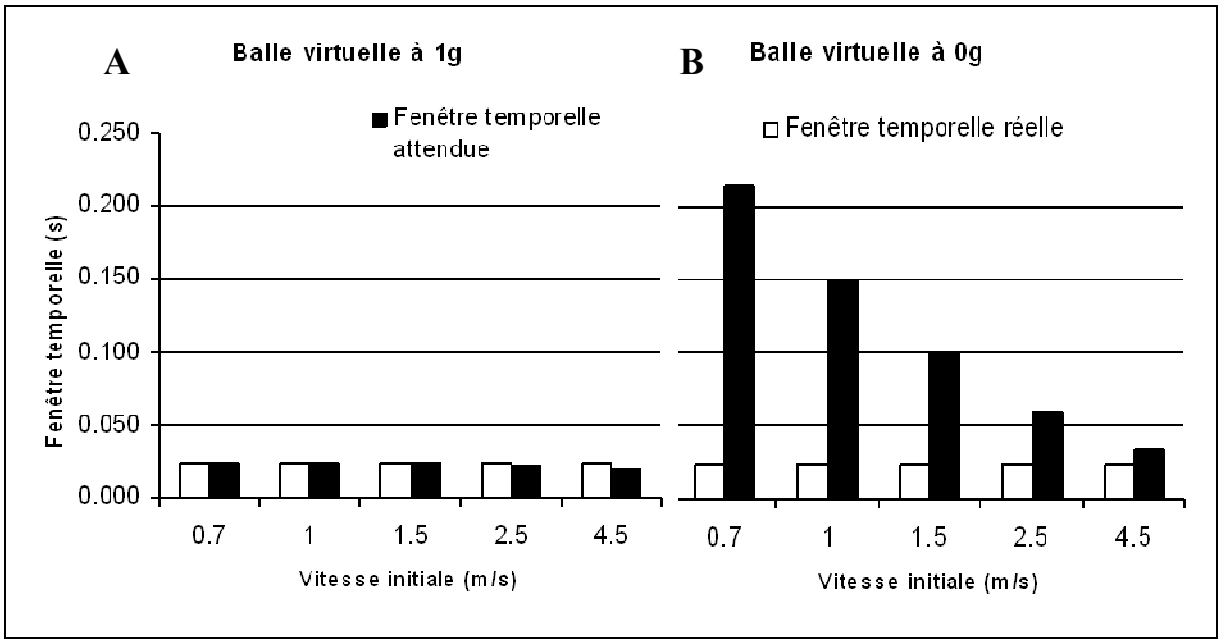


Figure 13A and 13B: Différence entre la fenêtre temporelle attendue issue de la balle virtuelle et la fenêtre temporelle réelle issue de la balle réelle dans la condition 1g (panel A) et dans la condition 0g (panel B) de Zago et al. (2004). Les fenêtres temporelles sont calculées pour un intercepteur de 6 cm et une balle de 9 cm après une chute de 2.04 m, selon l'accélération et la vitesse initiale de la balle et en prenant en compte la résistance de l'air.

Notre interprétation des résultats de cette expérience est soutenue par la deuxième expérience effectuée par Zago et al. (2004). Dans cette expérience, puisqu'aucune balle réelle ne tombait derrière l'écran, aucune confusion entre une fenêtre temporelle attendue et une fenêtre temporelle réelle n'était possible. Les résultats ont montré que les performances étaient clairement meilleures dans la condition 0g que dans la condition 1g. Nous émettons l'hypothèse que, plutôt que de supposer que la balle virtuelle a été considérée comme sans masse et ainsi non soumise à la gravité comme proposé par les auteurs, les résultats pourraient être dus à l'absence de différence entre la fenêtre temporelle attendue et la fenêtre temporelle réelle. Par conséquent, les participants pourraient avoir de meilleurs résultats dans la condition 0g du fait de l'incapacité du système visuel à prendre l'accélération en compte (e.g., Benguigui et al., 2003).

Un autre argument en faveur de cette explication alternative des résultats de Zago et al. (2004) vient des recherches menées par Tresilian et al. (e.g., Tresilian & Lonergan, 2002 ;

Tresilian & Plooy, 2006) montrant que le temps de mouvement d'une action d'interception rapide (150-200 ms) est préprogrammé, selon cette équation :

$$MT = a + bD + [\gamma + \delta L + \varepsilon W + \zeta D] \times V^{-1}, \quad (6)$$

où D est la distance entre la position initiale de l'effecteur et le point d'interception, V la vitesse de la cible, L_{balle} et $L_{effecteur}$ la taille de la balle et de l'effecteur respectivement; δ et ε représentent la sensibilité des participants à des changements de L_{balle} et $L_{effecteur}$ respectivement; γ est une représentation personnelle de [L_{balle} + $L_{effecteur}$] indépendante de sa valeur actuelle; ζ est l'intensité de l'interaction D/V et a-b sont des paramètres empiriques (voir Tresilian & Plooy, 2006 pour plus de détails). Puisque la vitesse de la cible affecte fortement le temps de mouvement, l'utilisation d'une simulation virtuelle sur la base de laquelle les participants planifient leur interception avec une vitesse différente que celle de la balle réelle à intercepter induira nécessairement des mouvements inappropriés et des erreurs dans la synchronisation du mouvement. De nombreuses études ont confirmé l'influence de la vitesse de la balle dans le mouvement d'interception (e.g., Brenner, Smeets & de Lussanet, 1998 ; Brenner & Smeets, 2005).

Enfin, dans les études de Zago et collaborateurs, les changements dans le temps de présentation (TP) de la balle induits par les changements de la vitesse initiale de la balle ou son accélération n'ont pas été contrôlés. Comme la vitesse (V) d'un objet, sa distance parcourue (DP) et TP sont des quantités physiques qui covarient, des changements de V tout en maintenant DP constante mènent à une modification de TP. Il a été montré qu'une diminution de V, associé à une augmentation de TP induit une augmentation du temps de mouvement d'interception et de sa variabilité (Brenner & Smeets, 1996 ; Carnahan & MacFadyen, 1996). Cela fournit une explication alternative pour la plus grande variabilité observée dans les réponses motrices dans la condition 0g. Dans cette condition, TP était plus grand que dans la condition 1g et V était plus faible que dans la condition 1g. Pour éviter ce

problème méthodologique, Tresilian et co-auteurs (e.g., Tresilian, Olivier & Carroll, 2003; Tresilian, et al., 2004; Tresilian & Houseman, 2005) maintiennent TP constant en variant DP. Comme le fait remarquer Tresilian (2005), ceci soulève la possibilité que l'effet de V pourrait être confondu avec des changements de DP. Cependant, aucune expérience précédente montrant que TP ou V influençaient le mouvement d'interception n'a jamais montré d'effet indépendant de DP (Brouwer, Brenner & Smeets, 2000, 2002). En conséquence, nous suggérons que la réplication de l'expérience de Zago et al. (2004) en maintenant égal (1) TP et (2) la fenêtre temporelle modifierait les résultats. Ceci pourrait être réalisé en variant (1) la hauteur de chute de la balle virtuelle et (2) la hauteur de chute de la balle réelle de telle manière que celle-ci entre dans la zone d'interception en même temps et avec la même vitesse que la balle virtuelle. Cependant, comme la balle réelle accélère du fait de la gravité, la différence entre la fenêtre temporelle de la balle réelle et celle de la balle virtuelle ne peut qu'être minimisée et non annulée dans le cas où la balle virtuelle chute à 0g.

Les résultats obtenus par Senot et al. (2005) n'ont pas non plus apporté de preuve indéniable de l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité. En effet, même si un faible effet de la gravité a été mis en évidence lorsque les informations visuelles et proprioceptives sont cohérentes avec la cinématique de la balle (accélération ou décélération), les résultats montrent surtout que la précision du timing est meilleure dans la condition 0g (vitesse constante) que dans les conditions cohérentes d'accélération et de sens du mouvement (balle se déplaçant de haut en bas en accélérant à 1g et balle se déplaçant de bas en haut en décélérant à 1g). Ces résultats contredisent l'utilisation d'une version quantitative du modèle interne de la gravité qui devrait mener à une meilleure précision dans les conditions 1g avec des informations proprioceptives congruentes que dans la condition 0g. Au lieu de cela, les résultats plaident en faveur d'une version qualitative du modèle interne de la gravité qui

pourrait permettre une réduction des erreurs pour les cibles mobiles accélérant ou décélérant sous l'effet de la gravité. Par exemple, la synchronisation des actions d'interception pourrait être modulée, en anticipant la synchronisation du mouvement quand l'objet se déplace vers le bas et en retardant cette synchronisation quand l'objet se déplace vers le haut.

Par ailleurs, la conclusion de Senot et al. (2005) concernant l'importance de la cohérence entre les informations visuelles et proprioceptives pour un usage possible d'un modèle interne de la gravité questionne l'étude de neuro-imagerie menée par Indovina et al. (2005) où la gravité visuelle ne coïncidait pas avec la gravité proprioceptive. En effet, dans cette expérience d'IRMf, les participants étaient allongés sur le dos et regardaient la scène par l'intermédiaire d'un miroir incliné. Ceci a comme conséquence un mouvement visuel de la balle orthogonal à la gravité, qui correspond à l'expérience contrôle de Senot et al. (2005) dans lequel aucune preuve de l'utilisation du modèle interne quantitatif de la gravité n'a été trouvée. De plus, reprenant les expériences de Hubbard (1995) sur la mémorisation du point de disparition d'un objet en mouvement, Nagai, Kazai et Yagi (2002) ont montré que l'effet de gravité représentationnelle n'apparaît que si l'objet se déplace sur l'axe de la gravité environnementale (c'est-à-dire de l'axe de la gravité naturelle) mais pas pour un mouvement le long de l'axe gravitaire égocentré (c'est-à-dire l'axe haut-bas de notre corps). Dans cette dernière expérience, les participants placés debout devaient estimer le point de disparition d'un objet se déplaçant verticalement de haut en bas ou de bas en haut, ainsi que d'avant en arrière ou d'arrière en avant (par rapport au point d'observation). La même stimulation était aussi proposée aux participants mais dans une condition allongée (face dirigée vers le sol), dans laquelle l'axe gravitaire égocentré est différent de l'axe gravitaire environnemental. Les auteurs n'ont retrouvé d'effet de gravité représentationnelle que dans les conditions où l'objet se déplaçait sur l'axe de la gravité environnementale, c'est-à-dire lorsque l'objet se déplace (du point de vue de l'observateur) de haut en bas (et inversement) lorsque les participants sont

debout et d'avant en arrière (et inversement) lorsque les participants sont couchés. Ces deux expériences plaident pour un alignement de l'axe gravitaire égocentré des participants sur l'axe gravitaire environnemental pour étudier l'hypothèse d'un modèle interne de la gravité, ce qui n'est pas le cas dans l'expérience d'Indovina et al. (2005).

D'autres contradictions apparaissent dans le travail d'Indovina et al. (2005). Dans leur expérience, Indovina et al. ont utilisé une photographie d'un décor pour ajouter du réalisme et des indices visuels à la simulation et contrebalancer la différence entre la gravité visuelle et proprioceptive. L'utilisation d'une simulation virtuelle reste cependant en contradiction avec les conclusions de Zago et al. (2004) qui énoncent que les balles virtuelles sont perçues comme sans masse et n'impliquent donc pas l'utilisation du modèle interne quantitatif de la gravité. Si l'hypothèse de Zago et al. (2004) est valide, il reste toujours à prouver que l'addition d'un environnement photographié pour rendre la simulation réaliste est suffisant pour que les participants perçoivent la balle comme ayant une masse dans cet environnement virtuel.

Ces données contradictoires ainsi que les limites méthodologiques soulignées dans les études visant à démontrer le rôle d'un modèle interne quantitatif de la gravité permettent de douter de la validité des conclusions des études de McIntyre et al. (2001a), Zago et al. (2004, 2005), Zago et Lacquaniti (2005a), d'Indovina et al. (2005) et de Senot et al. (2005). Ces doutes sont renforcés par les limites théoriques développées dans la section suivante que rencontre le modèle interne quantitatif de la gravité qui peuvent conduire à s'interroger sur l'intérêt véritable de développer un tel modèle.

1.2.6 Limites théoriques du modèle interne quantitatif de la gravité

Dans les études supposées démontrer l'existence d'un modèle interne quantitatif de la gravité, peu de choses sont dites sur la manière dont cette connaissance est utilisée dans le

timing des actions d'interception. On peut comprendre qu'il fournit des informations pour déterminer sur un mode prédictif le TTC. En développant cette idée, on peut supposer qu'une connaissance intégrée de la gravité (g) est combinée avec la perception de la distance (d) et la vitesse (v) de chute pour obtenir TTCg, le temps de chute, sur la base de l'équation suivante (Senot et al., 2005):

$$TTCg = \frac{-v + \sqrt{v^2 + 2g \times d}}{g} \quad (7)$$

Ce temps de chute serait alors utilisé pour programmer une réponse d'un temps égal à TTCg. En ceci ce modèle rejoint l'hypothèse du timing opérationnel de Tydesley et Whiting (1975).

Cependant, le modèle interne de la gravité fait l'hypothèse d'une accélération gravitaire constante ou variant de façon négligeable sur Terre. Ce n'est pourtant pas le cas. Même si nous sommes d'accord avec Zago et Lacquaniti (2005b) pour dire que les variations d'altitude et de latitude ont peu d'effet sur la valeur de g, un autre facteur peut avoir un effet important sur l'accélération gravitaire : la résistance de l'air.

L'hypothèse d'un modèle interne quantitatif de la gravité est en accord avec la théorie de Galilée selon qui le temps de chute d'un objet et sa vitesse verticale est indépendante de sa masse et dépend uniquement de la force de la gravité. Cependant, ce principe n'est vrai que dans le vide ou en l'absence d'atmosphère (sur la Lune par exemple)[7], ou bien encore pour un objet suffisamment dense pour que la résistance de l'air soit négligée au vu de sa distance de chute. Cependant, il y a beaucoup de situations d'interception dans lesquelles la résistance de l'air opposée à la gravité ne peut pas être négligée.

Il est donc nécessaire de clarifier les facteurs intervenant dans la résistance de l'air. Celle-ci dépend des propriétés de l'environnement (densité du milieu) et de l'objet : surface, vitesse et coefficient de frottement (Pagonis, Guerra, Chauduri, Hornbecker & Smith, 1997).

[7] où la gravité est d'environ 1.62 m/s²

Le coefficient de frottement est une valeur sans dimension dépendant des propriétés de l'objet comme la structure de sa surface et sa masse (Pagonis et al., 1997). Plus la surface de frottement est faible et la masse importante, moins la balle est affectée par la résistance de l'air (et inversement). La résistance de l'air augmente proportionnellement au carré de la vitesse de déplacement de l'objet. L'effet de la masse d'un objet sur la résistance de l'air est plus rarement évoqué dans les articles concernant le modèle interne quantitatif de la gravité. En effet, certaines publications mentionnent tout juste l'effet de la masse sur la résistance de l'air (Zago et al., 2004, 2005 ; Zago & Lacquaniti, 2005a) alors que d'autres ne le font pas (Lacquaniti & Maioli, 1989a & b ; Senot et al. 2005 ; Zago et Lacquaniti, 2005a & b). En raison du manque d'intérêt porté à ce facteur, et parce qu'une accélération dans un environnement naturel ayant une valeur exactement de 1g est aussi rare qu'un mouvement ayant une vitesse constante, il est nécessaire de décrire l'effet de la masse sur l'accélération.

Lorsqu'aucune résistance de l'air n'est appliquée à un objet en chute, comme sur la surface de la Lune, la seule force agissant sur la balle est son poids ($\vec{p}$) (avec un axe vertical orienté vers le bas). Selon la deuxième loi de Newton[8], nous savons que :

$$\vec{p} = m \times \vec{a}\,, \tag{8}$$

dans laquelle $\vec{a}$ est le vecteur d'accélération et m la masse de la balle. Nous savons aussi que $\vec{p} = m \times \vec{g}$ et obtenons par insertion et simplification $\vec{g} = \vec{a}$ (9)

Ainsi, la valeur de l'accélération de la balle est égale à la valeur de l'accélération terrestre.

[8] $\sum \vec{F}orces = m \times \vec{a}$

Considérons maintenant le cas sur Terre, dans lequel la résistance de l'air s'applique à la balle. Ici, deux forces agissent sur la chute de la balle : $\vec{p}$ et les frottements notés $\vec{f}$. La seconde loi de Newton s'applique toujours, donc:

$$\vec{p} + \vec{f} = m \times \vec{a} \tag{10}$$

Par insertion et simplification sur le modèle de l'équation (9), nous obtenons :

$$\vec{a} = \vec{g} + \frac{\vec{f}}{m} \tag{11}$$

Comme on peut le voir dans l'équation (11), l'accélération de la balle dépend de la masse de la balle. De plus, dans le cas d'une balle chutant verticalement, l'équation (11) mène à l'équation différentielle suivante (depuis laquelle la cinématique de la balle peut être obtenue) : $\frac{dv}{dt} = g - \frac{kv^2}{m}$, (12)

où $k = 0.5 \times Cr \times Rhau \times A$, Cr étant le coefficient de frottement d'une balle, Rhau la densité de l'air et A la surface de la balle.

Puisque l'accélération d'un objet en chute libre diminue sous l'effet de la résistance de l'air, les objets en chute libre ont une accélération qui décroit jusqu'à atteindre dans certains cas une vitesse limite dépendant de la densité de l'air, de la masse et de la forme de l'objet. Il est erroné de penser que cette vitesse limite est élevée et atteinte après un long temps de chute. En effet, cette vitesse limite peut être relativement faible et atteinte après seulement quelques secondes de chute, pour quelques objets comme un flocon de neige, une plume ou même une balle de tennis de table (Figure 14).

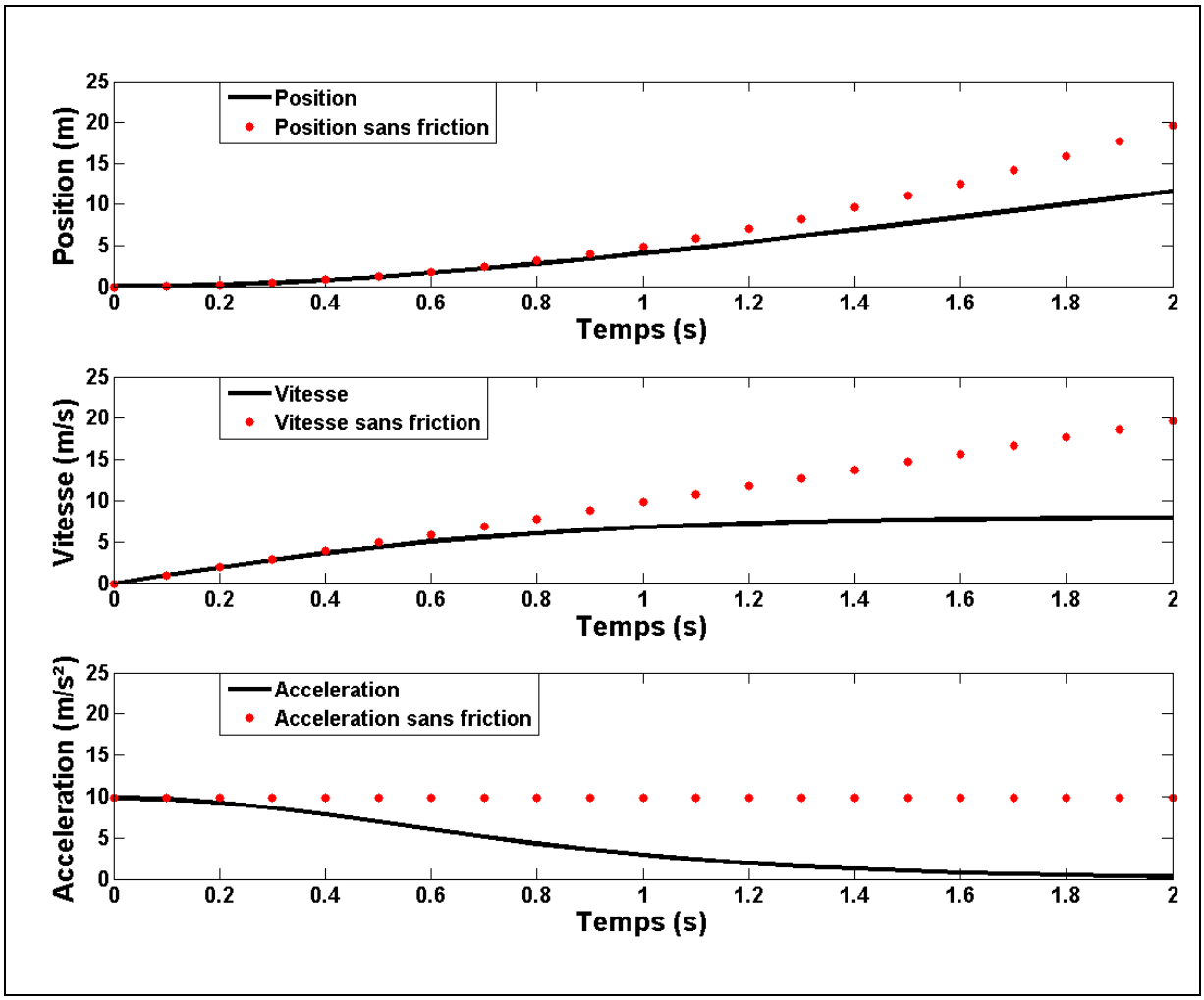


Figure 14: Evolution au cours du temps de l'accélération, vitesse et position d'une balle de tennis de table en chute libre (diamètre 4 cm et masse de 2.7g, règles de la Fédération Internationale de Tennis de Table). Après 0.726 s de chute, l'accélération a été divisée par deux, et 2 s après le début de la chute, elle n'est plus que de 0.3 m/s².

L'accélération étant affectée par la résistance de l'air, alors la vitesse de l'objet et son TTC le sont aussi. On pourrait supposer que la différence dans l'estimation du TTC négligeant la résistance de l'air et le TTC réel lorsque l'action est initiée est suffisamment faible pour permettre la réussite de l'action d'interception. Cette hypothèse est cependant peu vraisemblable. Pour une chute de deux mètres, le TTC d'une balle de tennis de table avec ou sans résistance de l'air est de 671 et 638 ms respectivement. La différence entre les TTCs est donc de 33 ms. Même si cette estimation du TTC est corrigée durant la chute de la balle en utilisant des informations visuelles sur la position et la vitesse de la balle, l'estimation du TTC

en utilisant une valeur constante d'accélération de 9.81m/s² empêche d'intercepter la balle. Par exemple, 300 ms avant que la balle atteigne le point d'interception, son accélération a diminué à 8.06 m/s². En corrigeant le TTC à ce moment en utilisant la position et la vitesse actuelle de la balle mais une accélération de 9.81m/s² donnée par le modèle interne de la gravité, l'estimation du TTC par les participants sera de 280 ms au lieu des 300 ms réelles, menant à un mouvement anticipé de 20 ms. Cette différence est assez importante lorsqu'on considère que la précision du timing requise dans une action d'interception peut être aussi faible que 5 ms (Regan, 1997). Même pour des balles plus lourdes, comme en baseball, la cinématique de la balle est significativement modifiée par la résistance de l'air. Coors Field, stade de l'équipe des Colorado Rockies est caractérisé par son altitude élevée (1610 m au dessus du niveau de la mer), où l'air est moins dense que dans les autres stades situés au niveau de la mer. D'après Chambers, Page et Zadins (2003), cette particularité (parmi d'autres) joue un rôle dans le fait qu'à Coors Field, les balles vont environ 6% plus loin que dans les autres stades placés au niveau de la mer, et que Coors Field dépasse tous les autres stades de la ligue majeure de baseball à la fois dans le nombre de homeruns et de homeruns par nombre de tentatives dans sept de ses huit premières saisons. Ces exemples montrent que sur Terre, les effets de la résistance de l'air ne devraient pas être négligés pour analyser le timing des actions d'interception.

Ainsi, l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité devrait être complétée par l'utilisation d'un modèle interne de la résistance de l'air et la connaissance de la masse de la balle afin d'obtenir une évaluation précise du TTC d'un objet en chute libre. L'utilisation d'une telle connaissance est théoriquement possible même si elle semble assez complexe (Oberle, McBeath, Madigan & Sugar, 2005; Craig, Berton, Rao, Fernandez & Bootsma, 2006).

Il est important de noter que les effets de la résistance de l'air ont aussi été ignorés dans d'autres types de tâche. Ainsi, certaines conclusions sur les connaissances explicites des individus à propos de la cinématique des objets en chute libre souffrent-elles aussi de la non prise en compte des effets de la résistance de l'air. Par exemple, selon Oberle et al. (2005), certaines études ont déclaré des réponses correctes alors qu'elles ne l'étaient pas, en ignorant les effets de la résistance de l'air (e.g., Champagne, Klopfer, & Anderson, 1980). Il est donc difficile de conclure, tout au moins sur la base de ces travaux, que les êtres humains possèdent une connaissance explicite erronée des principes physiques d'une chute libre comme le font Zago et Lacquaniti (2005c).

Une autre limite du modèle interne quantitatif de la gravité est liée au faible périmètre dans lequel il pourrait être utilisé. Son utilisation semble être uniquement limitée au cas d'une balle en chute libre. Pour des trajectoires paraboliques qui sont les plus fréquentes notamment dans les sports de balle, le modèle interne de la gravité serait inopérant. Ainsi, les résultats de Senot, Prévost et McIntyre (2003) montrent dans une tâche d'interception d'un pendule à contrepoids que les participants n'utilisent pas les informations portant sur l'accélération de l'objet pour ne prendre en compte que sa vitesse lors du contrôle du timing de l'activité musculaire. En outre, Regan (1997) énonce qu'en cricket, l'ignorance de l'accélération gravitaire empêche le batteur d'estimer précisément si la balle va rebondir avant d'être frappée et le lieu exact de ce rebond. En effet, bien que les êtres humains prédisent plutôt bien la localisation future d'un objet se déplaçant à vitesse constante, la précision spatiale se dégrade lorsque l'objet accélère, comme c'est le cas d'une balle chutant sous l'effet de la gravité. Le batteur, pour réussir son mouvement, doit déterminer si la balle va rebondir avant d'être frappée et le lieu de ce rebond. Un problème majeur que rencontre le batteur cependant est qu'il ne peut pas accéder directement ni à la hauteur physique de la balle (y), ni à sa

vitesse verticale (dy/dt). Sans ces deux variables physiques, le batteur ne peut pas prédire le lieu où la balle va rebondir avec les équations de cinématiques dans l'espace cartésien. Le batteur peut seulement accéder à l'information sur l'angle (γ) que la balle forme sur la rétine avec l'axe horizontal et sa vitesse angulaire ($d\gamma/dt$). Cependant, connaître γ et $d\gamma/dt$ ne suffit pas à connaître y et dy/dt, car leur relation dépend de la distance D séparant l'objet de l'observateur (Gray, 2002). De plus, les êtres humains estiment très mal la distance absolue d'un objet approchant (Regan, 1997). De ce fait, d'autres moyens doivent être trouvés pour estimer dy/dt. En l'absence d'information sur la distance absolue, deux équations donnant accès à dy/dt en sachant $d\gamma/dt$ ont été proposées (voir Gray, 2002, p1132 équations 4 et 5). Cependant, ces deux équations ne donnent accès qu'à des estimations de premier ordre. En conséquence, elles ne donnent des prévisions précises que si la balle se déplace à vitesse constante. Comme la gravité accélère la balle, le batteur a des difficultés pour estimer précisément où la balle va rebondir. Ceci expliquerait pourquoi il est si difficile de calculer cette prédiction exactement et pourquoi des mécanismes de régulation on-line du mouvement sont nécessaires. Des problèmes semblables ont été signalés en baseball pour estimer la hauteur verticale du lancé pour pouvoir frapper la balle (Gray, 2002).

1.3 Discussion

Dans cette première partie, nous avons passé en revue les preuves empiriques supposées étayer l'hypothèse d'un modèle interne quantitatif de la gravité. Cependant, nous avons montré que l'internalisation d'une valeur unique de g (i.e., 9.81 m/s^2) ne permet pas d'intercepter une balle en chute libre soumise à une résistance de l'air qui diminue son accélération pendant sa chute et modifie significativement son TTC. Nous avons aussi montré que les études apportant les preuves de l'internalisation quantitative de g présentaient des problèmes méthodologiques et que leurs résultats pouvaient être réinterprétés. Ces problèmes remettent en cause l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité ou minimise

fortement sa pertinence dans les actions d'interception. Cette partie ne remet pas en cause le fait que des représentations (implicites ou explicites) ou des attentes a priori peuvent être utilisées pour intercepter un objet en mouvement. Par exemple, de Lussanet et al. (2001 ; 2002) ont montré que les caractéristiques d'un essai (vitesse de l'objet, changement abrupte et imprédictible de la position de l'objet) ou le contexte (changement dans la résistance appliquée au mouvement d'interception) influencent le mouvement d'interception de l'essai n+1 (direction initiale du mouvement et erreur spatiale). Daum, Huber et Krist (2007) ont montré que la direction et la vitesse du sous-mouvement initial étaient différentes selon la prédictibilité du mouvement de la cible. Dans cette expérience, les participants devaient intercepter une cible se déplaçant sur une trajectoire prédictible (linéaire) ou sur une trajectoire non prédictible (non linéaire avec des changements de direction aléatoires). Les mouvements d'interception produits pour atteindre les cibles se déplaçant linéairement dans un bloc d'essais linéaires, ont été comparés aux mouvements d'interception produits pour atteindre les cibles se déplaçant linéairement dans un bloc d'essais mélangeant des trajectoires linéaires et non linéaires. Les résultats ont montré que le contexte dans lequel l'essai est réalisé modifiait la vitesse du geste ainsi que la direction du mouvement initial. Dans la condition de présentation des essais en ordre aléatoire, le mouvement initial était dirigé vers la position actuelle de la cible tandis que, dans la condition où tous les essais ont une trajectoire linéaire, le mouvement initial était dirigé en avant de la cible vers une position d'interception anticipée. De même, Miyazaki, Nozaki et Nakajima (2005) ont montré que les réponses dans une expérience de synchronisation coïncidence reflétait une intégration Bayésienne. Cela signifie qu'une connaissance ou expérience a priori du comportement de la cible est une information utile pour l'estimation du timing d'interception. Le dispositif expérimental était fait d'une rampe de trois LEDs, et l'intervalle de temps entre l'allumage de la LED 1 et de la LED 2 était identique à l'intervalle de temps entre l'allumage de la LED 2 et de la LED 3. Les

participants devaient appuyer sur un bouton lorsque la LED 3 s'allumait, en basant leur réponse sur l'information perçue de l'intervalle de temps entre l'allumage de la LED 1 et de la LED 2. Cet intervalle de temps pourrait être de 400 ms ±20 (faible variabilité) ou de 400 ms ±40 (large variabilité), tous les deux avec des distributions gaussiennes. Les résultats ont montré qu'après plusieurs centaines d'essais, la synchronisation des participants dépendait de la largeur de la distribution antérieure, comme prévu par un modèle Bayésien optimal.

Ces différentes expériences montrent donc que les invariants écologiques prélevés dans l'environnement (Gibson, 1979) ne sont pas la seule source d'information pour estimer le TTC dans toutes les situations. Elles montrent que d'autres informations, comme des indices perceptifs ou des connaissances a priori du comportement de la cible peuvent être pris en considération. Le concept d'internalisation d'un point de vue général n'est pas non plus remis en cause ici. Par exemple, nous sommes d'accord avec Proffitt et Kaiser (1998) qui énoncent que les propriétés géométriques d'un objet (e.g., conservation de la forme d'un objet pendant son mouvement) sont internalisées et peuvent être utilisées pour estimer le TTC (López-Moliner, Brenner & Smeets, 2007). Certaines régularités et propriétés de l'environnement pourraient être utilisées. Par exemple, Hayhoe et al. (2005) ont montré dans une tâche d'interception d'une balle après un rebond au sol que les êtres humains utilisent une connaissance des propriétés dynamiques de la balle (élasticité) à intercepter pour prédire la trajectoire de la balle après son rebond. Lorsque la balle habituellement interceptée, dont l'élasticité est connue, est remplacée par une balle plus élastique à l'insu des participants, ceux-ci deviennent incapables de réaliser le mouvement de poursuite oculaire auparavant produit pour suivre la balle après son rebond, et réalisent à la place une série de saccades oculaires. L'interception de la balle se fait donc en partie sur une prédiction de sa trajectoire. Ce résultat est cohérent avec l'observation de Land et McLeod (2000) selon laquelle la capacité de prédire rapidement et précisément la localisation de l'endroit de rebond de la balle

au cricket est importante pour réussir la frappe. La gravité elle-même pourrait être internalisée. Cependant, bien que nous puissions admettre qu'une connaissance implicite de la physique puisse biaiser notre mémorisation de la position finale d'un objet en mouvement disparaissant soudainement (Hubbard, 1995), la question se pose toujours si l'internalisation de la gravité est utilisée dans les actions d'interception en dépit de son omniprésence et de l'avantage théorique que le système perceptif pourrait en obtenir. Cette question est d'ailleurs cohérente avec les observations de Todd (1981) selon lesquelles les êtres humains n'utilisent pas toutes les informations et stratégies perceptives potentiellement disponibles pour contrôler leur action.

En l'absence de preuves décisives en faveur d'une internalisation quantitative de l'accélération gravitaire, la question restant à explorer concerne la stratégie utilisée par les être humains pour intercepter un objet accélérant ou décélérant sous l'effet de la gravité. Concernant le timing de l'effecteur[9], peu d'études se sont intéressées à la variable optique qui pourrait initier ou guider le mouvement d'interception. Lee et al. (1983) ont étudié l'information utilisée pour frapper une balle accélérée par la gravité. La tâche consistait pour les participants à frapper une balle chutant de différentes hauteurs (3 ; 5 et 7.2 m). Les résultats ont d'abord montré que plus la balle était relâchée haut et plus l'action motrice était longue. Il est également apparu que l'évolution des angles du genou et du coude était plus proche de l'évolution de $\tau(\theta)$ au cours du temps que de l'évolution du TTC. Les auteurs en ont conclu que l'évolution des angles du genou et du coude pendant la chute de la balle pouvait être expliquée par l'utilisation de $\tau(\theta)$. Même si $\tau(\theta)$ donne accès à TTC1 et non au TTC

[9] Certaines études (e.g., McLeod, Reed & Dienes, 2006 ; Chardenon, Montagne, Laurent & Bootsma, 2004 ; Bastin & Montagne, 2005) se sont intéressées au timing des déplacements locomoteurs pour attraper des balles en mouvement sur des trajectoires paraboliques. Cependant, les différents modèles proposés (e.g., annulation de l'accélération optique, annulation de l'angle d'approche) ne sont pas applicables au timing de la main pour intercepter une balle en chute libre.

exact, les auteurs ont proposé que TTC1 était suffisamment précis lorsqu'il était employé avec un couplage continu entre les systèmes perceptif et moteur qui permet des ajustements en ligne de l'action en cours. De fait, TTC1 converge vers TTC au cours du temps (Figure 12). Ceci est cohérent avec les résultats montrant l'utilisation d'une estimation de premier ordre du TTC dans les actions d'interception, issus d'expériences comportementales, (e.g., Montagne, Fraisse, Ripoll & Laurent, 2000), ainsi que d'expériences d'imagerie cérébrale comme celles de Merchant, Battaglia-Mayer et Georgopoulos (2004) ainsi que Merchant et Georgopoulos (2006) montrant que les variations dans le temps de l'activité des neurones dans le cortex moteur primaire (M1) des singes rhésus était modulée sur la base d'une estimation de premier ordre du TTC dans une tâche d'interception, confirmant les résultats de Port, Kruse, Lee et Georgopoulos (2001).

Cependant, l'étude de Lee et al. (1983) a été la cible d'un certain nombre de critiques remettant en cause ses résultats. Wann (1996) énonce pour sa part que le résultat montrant l'utilisation de $\tau(\theta)$ pourrait simplement être dû à un artefact de l'analyse. Selon Wann (1996), l'observation que l'évolution des angles du genou et du coude était plus proche de l'évolution de $\tau(\theta)$ est simplement due au fait que l'évolution des angles du genou et du coude est non linéaire et que celle-ci est comparée à l'évolution, elle aussi non linéaire, de $\tau(\theta)$, et que toute autre fonction non linéaire dans le temps aurait mené au même résultat, rejetant ainsi la démonstration de l'utilisation de $\tau(\theta)$. Ceci, en complément d'autres problèmes méthodologiques soulevés par Michaels, Zeinstra et Oudejans (2001) a conduit ces auteurs à reproduire la même expérience mais en utilisant en plus des conditions de vision monoculaire et binoculaire et deux tailles de balle. Les résultats contredisent partiellement les résultats de Lee et al. (1983). En effet, Michaels et al. (2001) ont trouvé que la variable utilisée pour initier et guider le mouvement du coude était θ' (la vitesse d'expansion de la balle) plutôt que $\tau(\theta)$, même si $\tau(\theta)$ expliquait mieux les données chez certains participants dans certaines

conditions particulières. Il est important de noter que ces deux variables optiques évitent la critique théorique adressée au modèle interne quantitatif de la gravité à propos de la résistance de l'air. Ceci est évident pour θ', qui ne donne pas accès au TTC et ne peut donc pas mener à une estimation faussée du TTC du fait de la résistance de l'air. Pour sa part, l'estimation du TTC en utilisant τ(θ) est constamment corrigée durant la chute de la balle et évite donc une influence de la résistance de l'air sur l'estimation du TTC.

Les résultats de certains auteurs comme Michaels et al. (2001), ou encore van der Kamp, Savelsbergh et Smeets (1997) ont aussi souligné des différences entre les conditions de vision monoculaire ou binoculaire, suggérant l'exploitation de différentes variables optiques selon les conditions de vision. Caljouw, van der Kamp et Savelsbergh (2004c) ont proposé que de multiples variables optiques soient impliquées dans la régulation des actions d'interception. Selon ces auteurs, les contraintes environnementales et organiques qui déterminent la spécificité de la tâche mèneraient à l'utilisation d'une source d'information unique parmi plusieurs, ou une combinaison de ces multiples sources d'information ne donnant pas nécessairement accès au TTC de l'objet (Figure 15). Il est à ce propos très intéressant de noter la diversité extrêmement importante des informations (variables optiques et indices perceptifs) susceptibles de jouer un rôle dans les actions d'interception[10] : τ(θ) (Savelsbergh et al., 1991), θ' (Caljouw, van der Kamp et Savelsbergh, 2004a), τ(φ,θ) (φ étant l'angle au point d'observation formé par les positions de l'objet et du point d'interception, Bootsma & Oudejans, 1993), θ'pour initier le geste et τ(χ,θ), χ' ou τ(χ) pour la fermeture de la main (χ étant l'angle au point d'observation formé par la main et l'objet à intercepter, Caljouw, van der Kamp et Savelsbergh, 2004b), disparité binoculaire (Regan, 2002), taille

[10] Dans les différentes études citées, le même symbole (majoritairement une lettre grecque) a parfois été utilisé pour spécifier deux variables optiques différentes (généralement un angle formé entre le point d'observation, le point d'interception, la main ou l'objet à intercepter) d'un article à l'autre. Par souci de clarté, nous avons donc modifié les symboles originellement utilisés dans ces articles afin de garder une relation univoque entre une variable optique et un symbole.

relative des objets (DeLucia, Kaiser, Bush, Meyer & Sweet, 2003), occlusion d'un objet (DeLucia, 2004b), η (une combinaison de θ et θ', López-Moliner & Bonnet, 2002) ; δ×γ'/θ' en condition de vision binoculaire et γ'/θ' en condition de vision monoculaire (δ étant une information spécifiant la taille de la balle, et γ' la dérivée de l'angle entre le plan sagittal et une ligne allant de l'œil au centre de la balle, Jacobs & Michaels, 2006). Selon Caljouw et al. (2004c), toutes ces informations pourraient être utilisées séparément ou en combinaison, selon les contraintes de la tâche. Les différentes combinaisons d'informations monoculaires et binoculaires (Bennett, van der Kamp, Savelsbergh, & Davids, 1999, 2000 ; van der Kamp, Bennett, Savelsbergh, & Davids, 1999) seraient faites soit par sommation ou par multiplication de plusieurs informations pondérées, et les pondérations pourraient être attribuées selon les contraintes de la tâche et la congruence des informations (Rushton & Wann, 1999 ; Smith, Flach, Dittman & Stanard, 2001 ; DeLucia et al., 2003 ; DeLucia, 2004a ; Kim & Grocki, 2006). Cette proposition de l'utilisation de différentes informations en fonction des contraintes de la tâche permettrait par ailleurs d'expliquer pourquoi tant d'informations différentes ont été mises à jour dans toutes les études citées plus haut. A chaque information identifiée correspondrait une tâche particulière : en effet, sous le terme générique d'action d'interception se cache une grande diversité dans l'action à réaliser. Il peut s'agir parfois d'attraper (e.g., McIntyre et al., 2001a) ou de frapper la balle (e.g., Brenner et al., 1998) ; le point d'interception peut être librement choisi (e.g., Lee et al., 1983) ou déterminé à l'avance (e.g., Tresilian & Lonergan, 2002) ; la balle peut être frappée pour atteindre un but (e.g., Caljouw et al, 2004a) ; l'interception peut être directe (e.g., Peper, Bootsma, Mestre & Bakker, 1994) ou indirecte (e.g., Benguigui et al., 2003) ; le mouvement de l'intercepteur peut être contraint sur une dimension en étant perpendiculaire au mouvement de la balle (e.g., Tresilian et al., 2003) ou sur la même dimension (e.g., Michaels et al., 2001) ou libre sur toutes les dimensions (e.g., Gray, 2002).

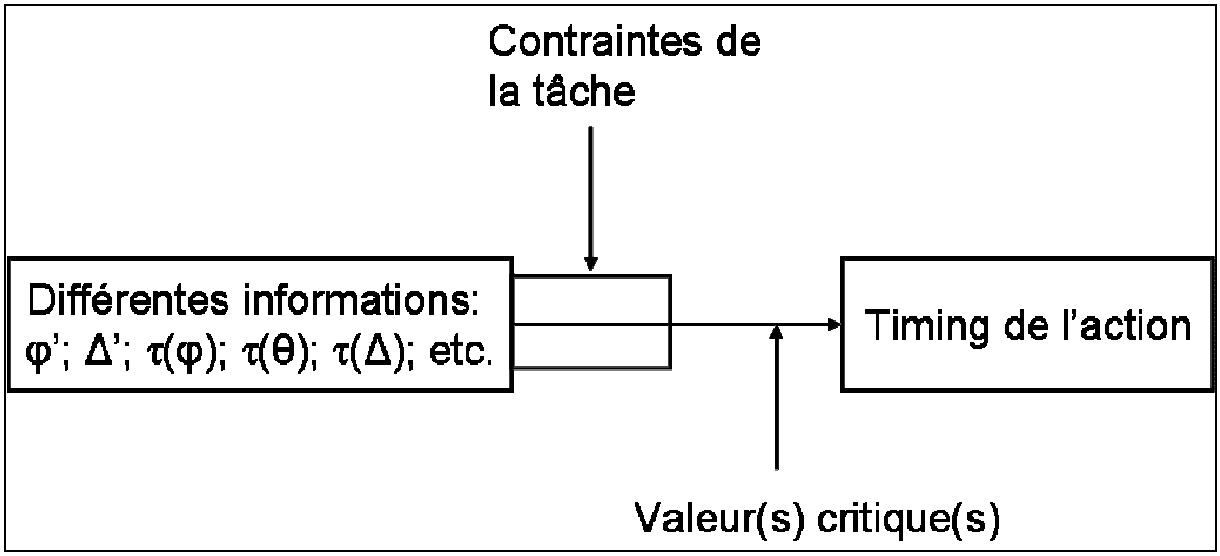


Figure 15 : représentation schématique du modèle de l'action dirigée, selon Caljouw et al. (2004c). Sur la base des contraintes de la tâche, différentes variables sont combinées ou sélectionnées et modulent directement l'action, sans nécessairement impliquer la perception du TTC.

Enfin, certaines caractéristiques individuelles interfèrent avec les capacités à estimer le TTC, l'âge par exemple comme cela a été montré dans une tâche de jugement d'arrivée par Benguigui, Ripoll et Broderick (2004), ainsi que Benguigui, Broderick, Baurès et Amorim (sous presse). Dans ces deux tâches, les participants devaient presser un bouton lorsqu'un stimulus atteignait un point d'interception spécifié à l'avance, et la partie finale de la trajectoire pouvait être occultée pendant un temps plus ou moins long. Le stimulus pouvait aussi adopter deux vitesses différentes. Les résultats ont montré que les enfants âgés de six à neuf ans utilisent indistinctement la distance d'occultation, c'est-à-dire la distance entre le début de l'occultation et le point d'interception ou le temps d'occultation, causant des erreurs lorsque l'information de distance est utilisée et une grande variabilité dans les résultats. Passés neuf ans, les participants semblent être capables d'utiliser de manière constante le temps d'occultation, c'est-à-dire de prendre en compte la vitesse du stimulus, même si leurs réponses restent plus variables que celles des adultes. Utilisant un paradigme d'anticipation

coïncidence, se différenciant des tâches de jugement d'arrivée par l'absence d'occultation de la trajectoire du stimulus, Lobjois et al. (2005) ont montré en testant trois groupes d'âge (20-30 ; 60-70 ; 70-80) et deux conditions de pratique physique (pratique du tennis vs. aucune pratique de sport de balle) que les erreurs commises en retard lorsque le stimulus accélère et en avance lorsqu'il décélère sont amplifiées par l'âge des participants si ceux-ci ne pratiquent pas une activité physique. Lobjois et al. (2005) expliquent cet effet de l'activité physique par un maintien d'un délai visuo-moteur bas, permettant ainsi de retarder l'initiation de la réponse plus longtemps et ainsi d'obtenir une estimation du TTC plus fiable, conclusion confirmée par les expérimentations de Lobjois, Benguigui et Bertsch (2006) ainsi que Lobjois, Benguigui, Bertsch et Broderick (sous presse). L'âge, un faible délai-visuo moteur (Le Runigo, Benguigui & Bardy, 2005) ainsi que son maintien à un faible niveau par une pratique physique font donc partie des contraintes (organiques) proposées par Caljouw et al. (2004c) pour déterminer l' (ou les) information(s) utilisée(s) pour intercepter un objet en déplacement.

Les différents éléments qui viennent d'être cités remettent en cause une idée forte de l'approche écologique d'une relation univoque (1:1) entre une information et un mouvement. Cette idée paraît maintenant rejetée par la plupart des chercheurs (e.g., Caljouw et al., 2004c). En revanche, une autre idée forte de l'approche écologique qui est celle du contrôle prospectif de l'action présente plusieurs avantages en comparaison d'un modèle prédictif tel que celui proposé par le modèle interne de la gravité. Un contrôle prospectif établit une relation particulière (une loi de contrôle, Warren, 1988) entre une ou plusieurs informations et un mouvement (e.g., Montagne, Laurent, Durey & Bootsma, 1999 ; Dessing, Bullock, Peper & Beek, 2002). Selon ce type de contrôle, l'action nécessite un contrôle en ligne sur la base d'une information spécifiant la relation entre l'acteur et l'environnement (e.g., Michaels, Jacobs & Bongers, 2006). La valeur de cette information, qui peut varier dans le temps, est

utilisée en continue comme un guide pour le timing de l'action. Dans les actions d'interception, cette information est utilisée pour atteindre le bon endroit au bon moment sans connaissance a priori de la place et du moment de contact (Peper et al., 1994). Pour leur part, les modèles prédictifs donnent lieu à des prédictions du lieu et/ou du moment de contact, qui peuvent être utilisées pour programmer le mouvement avant son initiation. Le mouvement peut ensuite être corrigé (ou reprogrammé) si nécessaire durant le déroulement de l'action sur la base d'une comparaison entre les feedbacks sensoriels attendus et ressentis (e.g., Pisella et al., 2000 ; Teixeira, Chua, Nagelkerke & Franks, 2006). Zago et al. (2004) énoncent que l'internalisation de la gravité est combinée avec des informations visuelles en ligne sur la position et la vitesse de l'objet pour prédire le TTC exact. On peut supposer que les prédictions du TTC soient corrigées durant la chute de la balle, ce qui permettrait de surmonter le problème de la modification du TTC par la résistance de l'air. Cependant, même si les informations de position et de vitesse peuvent être remises à jour pendant la chute de la balle, les changements dans l'accélération ne peuvent pas être remis à jour, et l'utilisation d'une valeur d'accélération spécifique de 9.81 m/s² au lieu de l'accélération réelle (Figure 14) empêche d'accéder au TTC exact. Un type de contrôle prospectif permettrait un timing précis même lorsque la balle est soumise aux effets de la résistance de l'air, alors que l'utilisation d'une valeur constante d'accélération dans un modèle prédictif ne le permet pas. De plus, cela permettrait un type de contrôle plus économique dans lequel il n'est pas nécessaire d'apprendre et de garder en mémoire la valeur exacte de g et dans lequel aucun calcul complexe n'est requis pour accéder au TTC. Pour intercepter un objet en mouvement, il est cependant nécessaire d'anticiper sa position même si un modèle prospectif est utilisé. En effet, les mouvements d'interception se font sur la base d'une information obtenue environ 150 à 200 ms plus tôt compte tenu du délai visuo-moteur existant chez les êtres humains, et l'objet à intercepter a changé de position le temps que l'information soit utilisable. Cette

anticipation pourrait être réalisée dans le système sensorimoteur, qui extrapolerait la position future des objets en mouvement, tandis que le système perceptif se représenterait la position de cible exactement selon Kerzel et Gegenfurtner (2003). En d'autres termes, lorsque des individus doivent localiser la position finale d'un objet en mouvement, alors ils ne commettent pas d'erreur[11]. Si les individus doivent par contre pointer la position finale de l'objet, leur réponse est décalée dans le sens du mouvement de l'objet. Cette extrapolation sensorimotrice compenserait donc le délai neuronal et s'assurerait que les mouvements d'interception sont dirigés précisément vers la cible.

Cependant, nous pouvons convenir qu'une connaissance a priori des effets de g pourrait être employée dans des situations spécifiques pour moduler le timing des actions d'interception, de manière qualitative. Nous pensons en effet que le rôle de la gravité a été considérablement exagéré. Il est abusif de considérer que le timing des actions d'interception puisse être basé sur un modèle interne de la gravité qui donnerait une prédiction quantitative et parfaite du TTC. Nous suggérons de qualifier cette connaissance comme un exemple de « connaissance implicite qualitative de la physique » pour décrire l'avantage qu'elle pourrait fournir en modulant l'action motrice. Cette conclusion est en accord avec les travaux de Hecht (Hecht et al., 1996 ; Hecht & Bertamini, 2000 ; Hecht, 2001). Théoriquement, un observateur pourrait utiliser la constance de la gravité pour estimer la taille absolue et la distance d'un objet en chute libre. Cependant, Hecht et al. (1996) ont montré que, même s'il est possible qu'une certaine abstraction de la gravité soit internalisée, les observateurs n'emploient pas

[11] Ce résultat, opposé à ceux trouvés par Hubbard (1995) s'expliquent par l'utilisation d'un point de fixation dans l'expérience de Kerzel et Gegenfurtner (2003) supprimant tout mouvement des yeux, ce qui a fait dire à Kerzel, Jordan et Müsseler (2001) et Kerzel (2000, 2006) que le moment représentationnel décrit par Hubbard (1995) est une conséquence de notre motricité oculaire et non un décalage perceptif comme proposé.

cette connaissance spécifique à un degré suffisant pour juger la taille absolue d'un objet en chute libre.

Puisque la connaissance des effets de la gravité ne pourrait être employée que dans des situations très spécifiques d'interception d'un objet en chute libre, la gravité pourrait appartenir à une des contraintes environnementales proposées par Caljouw et al. (2004c), et pourrait être employée en combinaison avec d'autres sources d'information pour intercepter l'objet (DeLucia et al., 2003). La pondération appliquée à cette information pourrait prendre une valeur nulle par exemple quand la balle roule sur un support (le sol par exemple en football), ou une valeur de 1 quand la balle se déplace verticalement (par exemple lors de l'entre deux en basket-ball). En conséquence, le système moteur serait « averti » que le timing de l'action devrait être modulé et que le mouvement d'interception doit être adapté et être initié plus tôt et/ou être exécuté plus rapidement en cas de mouvement de haut en bas de la balle et inversement, en cas de mouvement ascendant. C'est la raison pour laquelle nous préférons définir ce processus comme une connaissance implicite qualitative de la physique plutôt que comme un modèle interne : les gens savent seulement l'effet de la gravité et n'ont pas vraiment internalisé cette constante.

1.4 Hypothèse

Dans cette partie théorique, nous avons montré que les preuves en faveur de l'hypothèse d'un modèle interne quantitatif de la gravité peuvent être remises en cause, notamment parce que l'utilisation d'un modèle interne de la gravité donnant le TTC exact d'un objet en chute libre devrait inclure les effets de la résistance de l'air, négligée jusqu'alors par les tenants du modèle interne et quantitatif de la gravité. Cependant, certains résultats suggèrent un effet qualitatif de la gravité (e.g., McIntyre et al., 2001a ; Senot et al., 2005), qui pourrait résulter d'une connaissance des effets de la gravité. Cet a priori alerterait les

individus que la vitesse d'une balle augmente lorsque celle-ci est en chute libre sans pour autant être utilisé au plan quantitatif pour le timing du geste d'interception.

Par conséquent, nous rejetons la démonstration actuelle de l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité. Nous proposons à la place un contrôle de type prospectif basé sur une ou plusieurs informations optiques, pouvant être combiné à une connaissance qualitative des effets de la gravité, permettant par exemple de démarrer le mouvement plus tôt ou plus vite dans les cas de balle en chute libre. De ce fait, l'existence d'un modèle interne quantitatif de la gravité est donc inutile selon le principe du rasoir d'Occam énonçant que « les entités ne devraient pas être multipliées au delà du nécessaire ». Nous proposons ainsi que le cerveau utilise le principe du rasoir d'Occam plutôt qu'une internalisation des lois de Newton (Baurès, Benguigui, Amorim et Siegler, 2007).

Les expériences menées durant cette thèse ont eu pour but d'explorer les sources d'informations possibles et les effets d'une connaissance a priori des effets de la gravité, dans les jugements perceptifs et dans les actions d'interception. En effet, comme énoncé plus haut, il est possible que la gravité soit utilisée différemment pour des jugements strictement perceptifs et pour la réalisation d'actions motrices.

Dans le chapitre 2, nous avons utilisé des expériences de jugement pour connaître l'influence de la gravité sur notre perception. Dans une première expérience, nous avons utilisé le paradigme expérimental développé par Michotte (1963) de jugement de causalité. Dans une deuxième expérience, nous nous sommes intéressés à la perception de la gravité lorsque le participant observe ou agit dans une tâche de rebond de balle.

Dans le chapitre 3, nous nous sommes intéressés aux tâches d'interception indirecte telles qu'elles ont été définies par Benguigui et al. (2003). Dans ce type de tâches, les participants doivent déclencher le mouvement d'un intercepteur pour que celui-ci entre en

collision avec un objet à un point d'interception. Cela a pour effet de rendre impossible toute modification de la trajectoire de l'effecteur durant son mouvement. Ceci permet de faire des prédictions sur les erreurs susceptibles d'être commises par le participant en fonction de l'information utilisée. Par exemple, cette erreur sera nulle si l'information est parfaitement exacte. En revanche, l'erreur sera non nulle si l'information rend compte approximativement du TTC et nécessite normalement un couplage continu pour intercepter l'objet.

Enfin dans le chapitre 4, nous avons utilisé des tâches d'interception directe dans lesquelles les participants devaient faire entrer en contact un effecteur qui était contrôlé en continu avec une balle virtuelle ou réelle en chute libre. La particularité de ces dernières tâches était que les participants pouvaient réguler leur geste jusque dans les quelques 100 à 150 ms qui précèdent le contact, délai qui est généralement admis comme un délai visuo-moteur ne permettant plus d'ajuster le mouvement (e.g., Tresilian, Plooy & Carroll, 2004). Cela signifie que l'utilisation d'une information rendant compte de manière approximative du TTC pouvait permettre une interception précise via un couplage continu entre le système perceptif et le système moteur, entre l'information et le mouvement.

L'utilisation de ces trois paradigmes expérimentaux, dans lesquels l'implication des processus moteur est manipulée, devrait nous permettre dans un premier temps d'identifier une éventuelle différence dans l'effet de la gravité en fonction de la tâche à réaliser, perceptive ou motrice, puis dans un second temps de caractériser le fonctionnement de ces différents modèles internes, quantitatifs ou qualitatifs. Il était ainsi possible de prédire par exemple que l'utilisation d'une connaissance des effets de la gravité devait surtout se manifester dans les tâches de jugement perceptif et d'interception indirecte (prédictive). En revanche, dans les tâches d'interception directe permettant le couplage, on pouvait s'attendre à ce que l'utilisation de ces connaissances soit faible et se révèle donc très marginale.

Chapitre 2

Gravité et tâches de jugement perceptif

Chapitre 2 : Gravité et tâches de jugement

Comme nous l'avons souligné dans le chapitre 1, la gravité biaise notre mémorisation spatiale de la position finale d'un objet en mouvement, et cela a été interprété par Hubbard (1999) comme la preuve que nos représentations mentales extrapolent les effets des principes invariants de la physique. Nous avons voulu déterminer si cette influence de la gravité implicite se retrouvait dans une autre tâche de jugement perceptif, et déterminer surtout si son effet pouvait être de nature quantitative (c'est-à-dire correspondant à une valeur exacte ou très proche de 9.81 m/s²) et non seulement qualitative (c'est-à-dire, correspondant à la connaissance du seul principe qu'un objet qui chute accélère).

2.1 Expérimentation 1

2.1.1 Problématique

Pour tester notre hypothèse, nous nous sommes appuyés sur une méthode élaborée par Michotte (1963) qui concerne le jugement de causalité, avec laquelle il a été montré que nos représentations peuvent intervenir pour façonner notre perception des évènements (Michotte, 1963). Une forme classique de causalité mécanique étudiée par Michotte (1963) est l'« effet de lancement » (Figure 16). Michotte a montré que lorsque l'on demande à des personnes d'observer un objet A en mouvement qui entre en contact avec un objet B initialement immobile, les observateurs pensent que l'objet A est à l'origine du mouvement de l'objet B. Michotte (1963) a montré que l'impression causale du lancement est considérablement diminuée quand la cible va au-delà de ce qu'il appelle le « rayon d'action du lanceur ». Ce rayon est défini comme étant la distance dans laquelle le mouvement du stimulus « lanceur » est toujours la cause du mouvement de la cible. Au delà de cette distance le mouvement de la cible n'est plus attribué au « lanceur », la cible semble se déplacer sous l'influence d'une force interne.

Chapitre 2 : Gravité et tâches de jugement

De quelle manière les individus interprètent-ils la stimulation visuelle et quelles sont les forces utilisées pour répondre aux tâches de jugement de causalité ? En d'autres termes, les individus utilisent-ils uniquement les propriétés géométriques et cinématiques de la stimulation visuelle (e.g., vitesse et taille des objets) ou leur réponse est-elle déterminée par des forces que les individus attribueraient implicitement aux objets ?

Dans notre environnement, lorsqu'un objet A entre en collision avec un objet B statique, il peut lui transmettre suffisamment d'énergie pour le mettre en mouvement. Dans ce cas, l'objet B se déplace et dissipe son énergie par frottements, jusqu'à s'arrêter lorsque celle-ci est entièrement dissipée (dans le cas où l'objet B ne posséderait pas d'énergie propre venant par exemple d'un moteur lui permettant de rester en mouvement). La distance parcourue par l'objet B dépend de plusieurs facteurs, comme par exemple la quantité d'énergie transmise par l'objet A (venant de sa vitesse à l'impact, sa masse, etc.), des caractéristiques de l'objet B (masse, etc.), et de l'environnement dans lequel A et B se déplacent (friction du sol, déplacement sur une pente, etc.). Des travaux récents s'inspirant de ceux de Michotte (1963), ont montré que les résultats obtenus dans les tâches utilisant l'« effet de lancement » reflètent une incorporation des effets subjectifs des différentes forces auxquelles est soumis le déplacement de la cible, comme la gravité, la friction, la force centripète, etc. (Hubbard, Blessum & Ruppel, 2001 ; Hubbard & Favretto, 2003 ; voir néanmoins Kerzel, 2005, pour un avis contraire). Cependant, la nature de cette incorporation des effets des différentes forces n'est pas établie, quantitative ou qualitative.

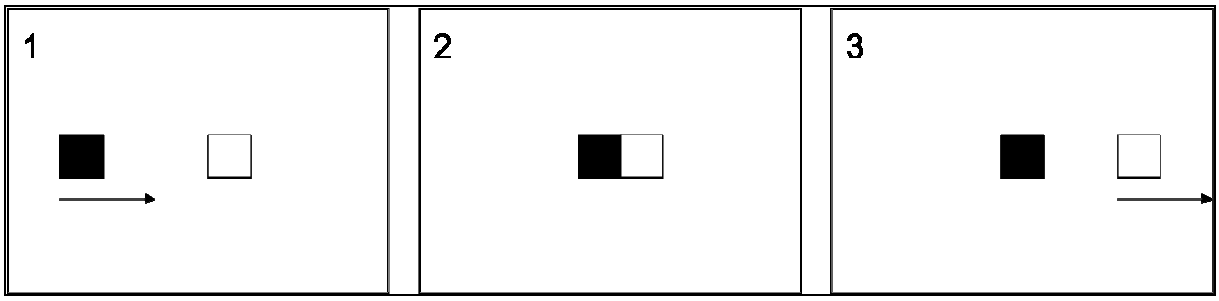


Figure 16 : illustration de l'effet de lancement de Michotte (1963). 1 : un objet A (carré noir) se déplace vers un objet fixe B (carré blanc). 2 : l'objet A entre alors en collision avec l'objet B. 3 : l'objet B entre alors en mouvement tandis que l'objet A s'arrête. D'après Hubbard (2005).

En collaboration avec le professeur Armando de Oliveira de l'université de Coimbra, Portugal, et Isabelle Siegler de l'université Paris Sud, nous avons voulu déterminer dans la première expérience si les jugements perceptifs dans le paradigme de Michotte (1963) reflètent une connaissance des effets de la gravité. Dans la tâche utilisée, les participants devaient indiquer à partir de quelle distance (dite « rayon d'action ») le déplacement de l'objet B initialement immobile et entré en mouvement suite à une collision de l'objet A n'est plus dû à la collision (i.e., son déplacement est devenu autonome). Pour déterminer l'effet de la gravité sur ce jugement, nous avons voulu étudier si le point à partir duquel le mouvement de B est considéré comme autonome est influencé par la trajectoire de l'objet, montante (+30°), horizontale (0°), ou descendante (-30°). En effet, lorsque la scène est présentée sur un écran vertical, en se déplaçant sur une trajectoire montante, l'objet B se déplace contre la gravité et devrait donc dissiper plus vite l'énergie transmise par la collision avec A. De ce fait, le mouvement de B devrait être considéré comme n'étant plus dû à la collision avec A après avoir parcouru une courte distance après la collision. Au contraire, en se déplaçant vers le bas, l'objet B se déplace dans le sens de la gravité et ne dissipe que faiblement l'énergie impartie par la collision avec l'objet A. Le mouvement de l'objet B devrait dans ce cas être considéré comme autonome après avoir parcouru une distance plus grande. Par contre, lorsque la même stimulation visuelle est présentée sur un écran orienté horizontalement, il ne devrait pas y

avoir de différence selon la direction du mouvement, le mouvement des objets se faisant dans un plan horizontal, orthogonal aux effets de la gravité. Nous avons aussi voulu déterminer si d'autres paramètres étaient pris en compte, comme une friction du sol, la distance entre la scène et l'observateur, etc. L'effet de la friction a été étudié par la présence ou l'absence d'un sol sur lequel le lanceur et la cible se déplacent. Lorsqu'un sol est présenté, les participants devraient implicitement considérer qu'une force de friction s'oppose au mouvement et ainsi indiquer un rayon d'action plus faible que lorsque le sol n'est pas affiché. Enfin, pour que les participants puissent déterminer de manière métrique la distance parcourue par la cible après son contact avec le lanceur, il est nécessaire qu'ils connaissent la distance les séparant de la scène visuelle. En fournissant une information explicite aux participants sur la distance de la scène visuelle, nous devrions observer des valeurs différentes de rayon d'action dans le cas d'une utilisation quantitative de la gravité, alors qu'une utilisation qualitative ne devrait pas induire de différence dans les réponses (Figure 17).

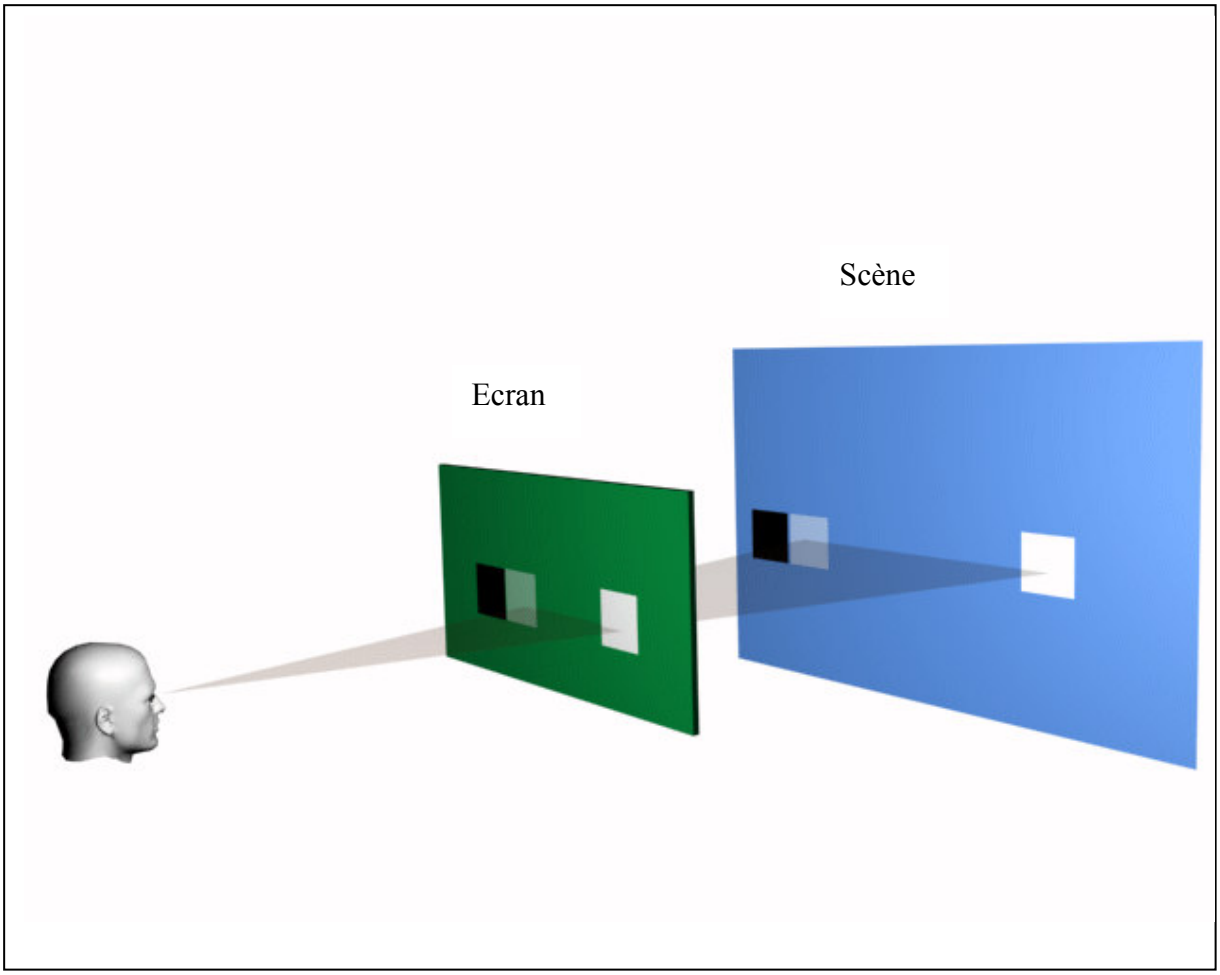


Figure 17 : Effet de la distance à la scène visuelle sur le rayon d'action (RA). Selon le théorème de Thalès, $\frac{RA_{Ecran}}{RA_{Scène}} = \frac{D_{Ecran}}{D_{Scène}}$ *(avec* D_{Ecran} *et* $D_{Scène}$ *la distance entre l'observateur et l'écran ou la scène visuelle respectivement), le RA estimé par le participant est donc* $RA_{Scène} = RA_{Ecran} \times \frac{D_{Scène}}{D_{Ecran}}$*. Le carré noir représente le lanceur, le carré grisé la position initiale de la cible et le carré blanc la cible. Le RA est représenté par la base du triangle partant du point d'observation.*

2.1.2 Protocole expérimental

Nous avons étudié à l'aide d'une tâche de causalité mécanique la manière dont les représentations de différents facteurs de la physique peuvent influencer les estimations du RA d'un lanceur sur un objet se déplaçant après une collision.

Dans cette expérience, le lanceur se déplaçait vers la cible jusqu'à entrer en contact avec celle-ci. La cible se déplaçait alors dans la même direction jusqu'à quitter l'écran alors

que le lanceur était arrêté à l'endroit de la collision. Après la disparition de la cible, un curseur de souris (sous la forme d'un signe « plus ») était affiché au centre de l'écran. Les participants devaient placer le centre du curseur à l'endroit où ils estimaient que le mouvement de la cible était devenu autonome.

La distance parcourue sur l'écran par le lanceur avant d'entrer en collision avec la balle était toujours identique dans tous les essais, mais le couple lanceur et cible pouvait être positionné à trois endroits différents sur l'écran. De plus, le mouvement pouvait se faire vers la droite ou vers la gauche. Les animations étaient projetées sur un écran de 1024 × 768, le lanceur et la cible étaient représentés par des carrés de 20 pixels de coté. Comme dans Hubbard et Ruppel (2002), le lanceur se déplaçait environ trois fois plus vite que la cible.

Pour cela, une expérience a été réalisée avec le plan expérimental suivant :

S⟨Consigne de distance (3) × Friction (2)⟩ ×Orientation de l'écran (2) ×Pente (3)

avec *Consigne de distance* (Pas de consigne vs. 15 m vs. 1500 m) et *Friction* (Sol vs. Sans sol) en facteur inter sujet, et *Orientation de l'écran* (Horizontal vs. Vertical) et *Pente* (0° vs. +30° vs. -30°) en facteur intra sujet. Pour les consignes de distance 15 m et 1500 m, les groupes étaient constitués de huit participants chacun, et pour la condition sans consigne de distance les groupes étaient constitués de dix participants chacun, soit en tout 52 participants (33 hommes et 19 femmes, âge moyen 23 ans ±2.5).

Dans le groupe *friction*, le lanceur et la cible se déplaçaient sur un sol (une ligne grise de 10 pixels de largeur) soit vers le bas (-30°), horizontalement, ou vers le haut (+30°) en coordonnées visuo-centrées (condition de *pente*). Pour le groupe *sans friction,* les mouvements du lanceur et de la cible étaient les mêmes mais sans afficher le sol. De plus, selon le sous groupe, les participants ne recevaient soit : aucune consigne les informant sur la distance à la cible virtuelle (condition *pas de consigne*), soit pour les deux autres conditions,

les participants étaient explicitement informés de la distance virtuelle les séparant du lanceur et de la cible avant chaque essai, qui pouvait être de 15 ou 1500 mètres (conditions *15 m* et *1500 m*). Afin de mieux se représenter la distance virtuelle avant chaque bloc, une image d'un objet familier, un train vu de face ou d'au-dessus de 15 ou de 1500 mètres était présentée avant chaque bloc. Enfin, les participants étaient informés de la taille du lanceur et de la cible, 30 cm pour la condition *15 m* ou 23 m pour la condition *1500 m*. Ces deux informations de distance et de taille étaient répétées avant chaque essai par une consigne écrite indiquant par exemple pour la condition *15 m* avec l'écran positionné horizontalement « Vous êtes à 15m au-dessus des objets carrés qui mesurent 30 cm de côté ! ». En outre, selon la condition de présentation, l'écran pouvait être présenté aux participants verticalement ou horizontalement (écran couché sur une surface de table, les participants regardant l'écran d'au dessus).

Les valeurs de rayon d'action (en pixels) ont été soumises à une ANOVA de la forme S⟨Consigne de distance (3) ×Friction (2)⟩ ×Orientation de l'écran (2) ×Pente (3). Pour tous les tests statistiques, un seuil de significativité alpha de .05 a été utilisé et des tests post hoc de Newman-Keuls ont été réalisés pour identifier l'origine des différences significatives. Deux participants présentant des résultats aberrants ont été exclus de l'analyse. Pour ces deux participants, le rayon d'action du lanceur dans la condition sol et écran vertical augmentait avec une augmentation de la pente (-30° ; 0° et +30°), de manière totalement contradictoire avec la physique. Cependant, le maintient ou l'exclusion de ces deux participants ne modifient en rien les résultats.

2.1.3 Résultats

Les résultats (voir annexe A pour toutes les valeurs de rayon d'action des participants des différentes conditions) ne montrent pas d'effet moyen de la consigne de distance, $F(2, 44) = 1.81$, $p > .05$, sur le rayon d'action (RA) (Figure 18) (193 pixels ±91 dans la

condition 15 m, 187 ±89 dans la condition 1500 m et 232 ±96 dans la condition sans consigne, voir tableau 1 pour un récapitulatif de tous les résultats). L'ANOVA montre par contre un effet de la friction, $F(1, 44) = 5.04$, $p < .05$, le RA étant significativement plus court lorsqu'un sol est présent (181 pixels ±90 dans la condition *friction* contre 232 ±92 dans la condition *sans friction*). L'ANOVA ne montre par contre aucun effet principal de l'orientation de l'écran sur le RA, $F(1, 44) < 1$ (204 pixels ±83 lorsque l'écran est orienté horizontalement contre 211 ±105 lorsque l'écran est orienté verticalement). Plus attendu, l'analyse montre un effet principal de la pente sur le RA, $F(2, 88) = 27.73$, $p < .05$, avec un RA de 233 pixels ±103 dans la condition -30°, 204 pixels ±79 dans la condition 0° et 186 pixels ±95 dans la condition +30°. Un test post hoc montre que les trois valeurs de RA en fonction de la pente de déplacement sont toutes significativement différentes les unes des autres.

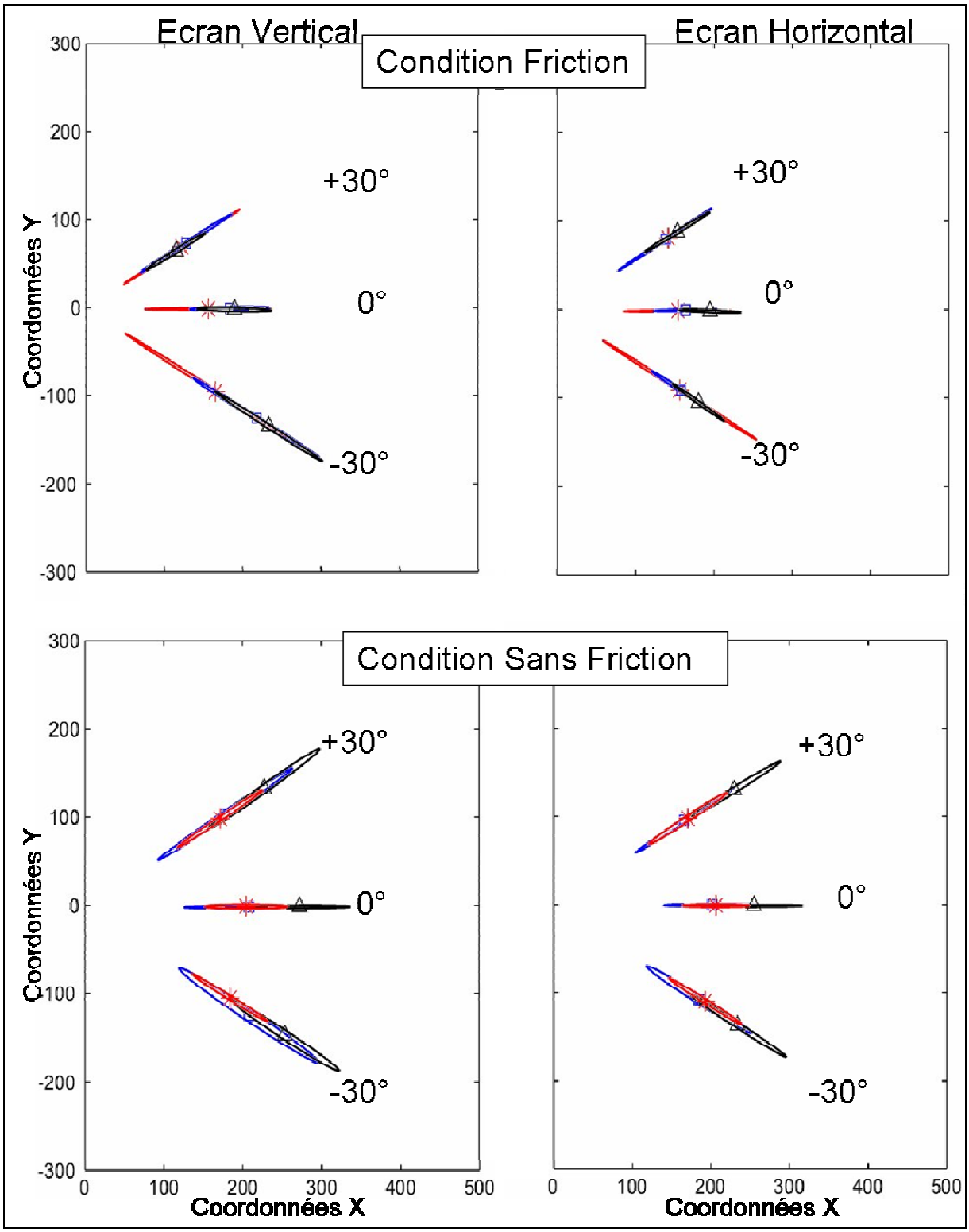


Figure 18 : Coordonnées XY du RA (l'origine étant 0,0 pour la position initiale du centre de la cible) en fonction des groupes friction et des conditions de pente et d'orientation de l'écran. Les tracés représentent les ellipses de confiance[12] à 95% des coordonnées de RA, en bleu pour la consigne de distance 15 m (□), en rouge pour la consigne de distance 1500 m (∗) et en noir pour l'absence de consigne de distance (△).

[12] Il ne s'agit pas des ellipses de confiance représentant pas 95% des données observées mais d'ellipses estimant la valeur de la performance de la population sur la base du t de student tenant compte de la taille de l'échantillon.

Tableau 1 : Rayons d'action moyens (en pixels) des observés dans l'ensemble des conditions

Consigne de distance	Condition de friction	Ecran horizontal			Ecran vertical		
		-30°	0°	+30°	-30°	0°	+30°
15 m	Friction	174 ±51	164 ±52	151 ±86	246 ±118	182 ±65	132 ±72
	Sans friction	214 ±92	202 ±73	192 ±86	243 ±124	208 ±98	206 ±120
1500 m	Friction	198 ±136	162 ±86	149 ±74	210 ±160	159 ±104	122 ±94
	Sans friction	222 ±64	206 ±51	197 ±69	212 ±66	205 ±63	198 ±75
Sans consigne	Friction	208 ±55	195 ±55	176 ±66	269 ±111	189 ±66	132 ±60
	Sans friction	271 ±100	255 ±87	264 ±94	293 ±112	272 ±90	263 ±117

L'ANOVA montre aussi plusieurs effets d'interaction. Tout d'abord, une interaction Friction × Pente, $F(2, 88) = 7.66$, $p < .05$ (Figure 19). Le test post hoc montre que dans la condition s*ol*, le RA varie systématiquement selon la condition de pente (il devient plus faible avec une augmentation de la pente). Par contre, dans la condition s*ans sol*, la seule différence apparaît entre la condition -30° et la condition +30°, aucune de ces conditions n'étant différente de la condition 0°.

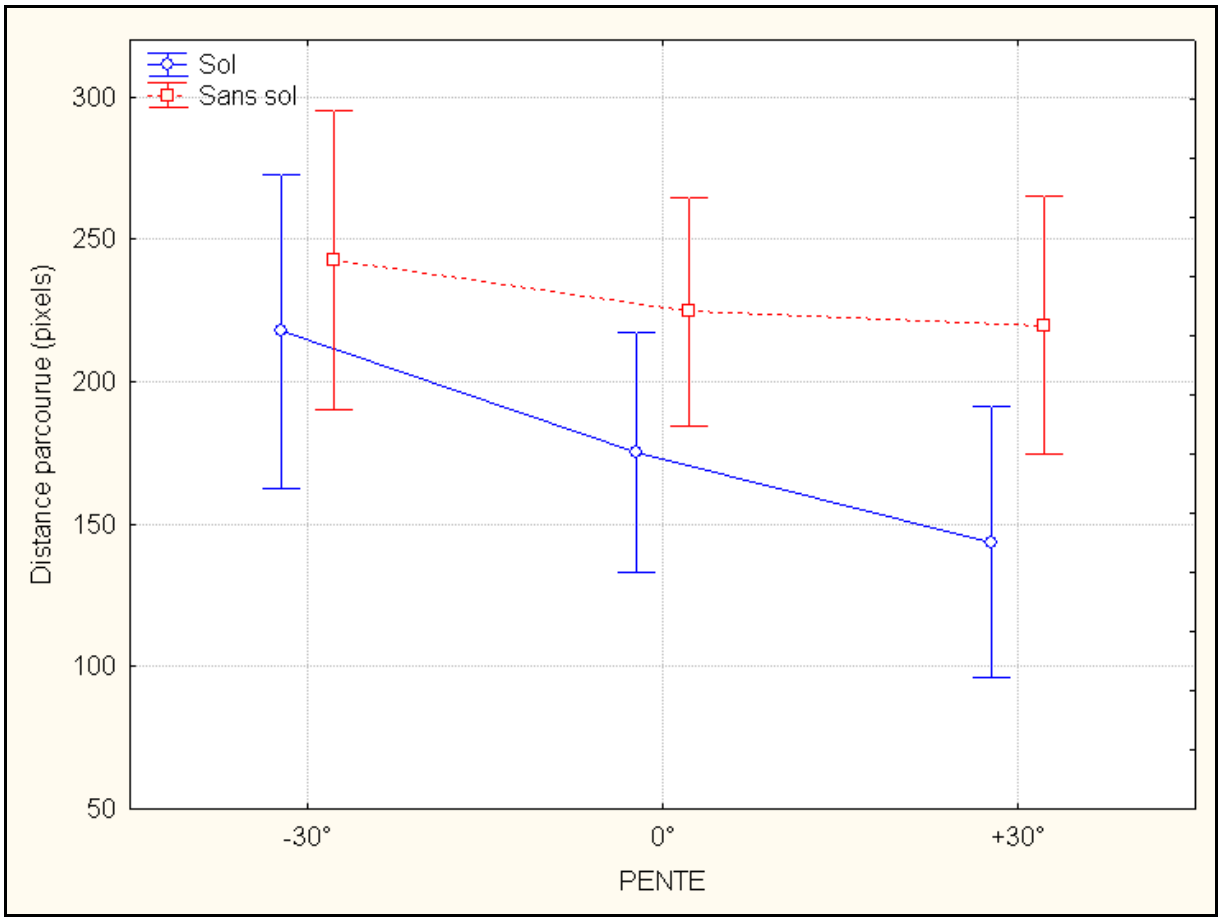


Figure 19 : effet d'interaction Friction × Pente sur le rayon d'action observé.

L'ANOVA révèle également un effet d'interaction Orientation de l'écran × Pente, $F(2, 88) = 12.58$, $p < .05$ (Figure 20). Le test post hoc montre que quand l'écran est orienté verticalement, le RA varie systématiquement selon la condition de pente (le RA devenant plus faible avec une augmentation de la pente), tandis que lorsque l'écran est orienté horizontalement, le RA diffère entre les conditions -30° et 0° et entre les conditions -30° et +30° (le RA devenant plus faible avec une augmentation de la pente), mais qu'il n'y a pas de différence entre les conditions 0° et +30°.

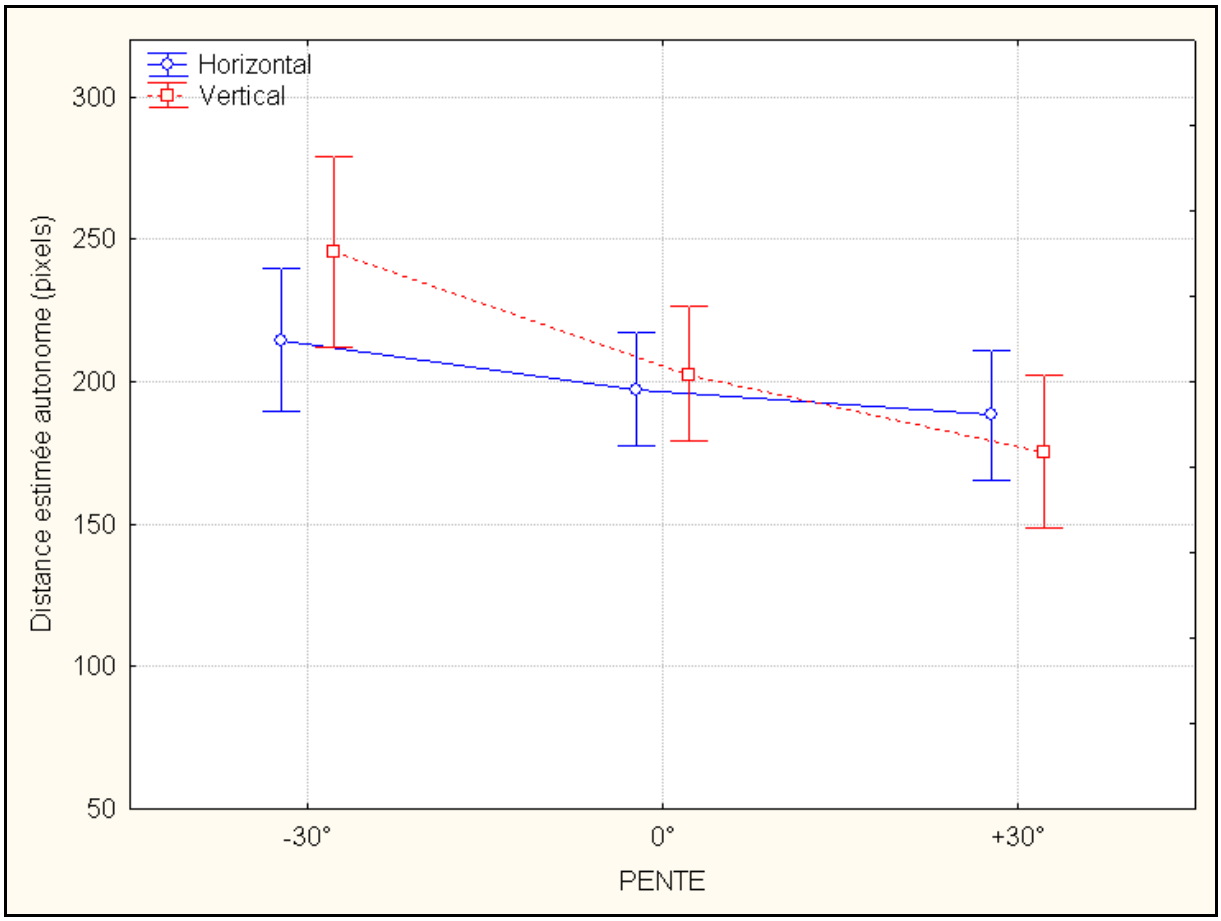


Figure 20 : Effet d'interaction Orientation de l'écran × Pente sur le rayon d'action observé.

Enfin, l'ANOVA met à jour un effet d'interaction d'ordre deux, Orientation de l'écran × Friction × Pente, $F(2, 88) = 8.02$, $p < .05$ (Figure 21). Pour déterminer quelles sont les différences significatives dans cette interaction, nous avons décidé de conduire deux ANOVAs séparées[13] de la forme S⟨Friction (2)⟩ × Pente (3), l'une sur les données de la condition d'orientation de l'écran horizontale, l'autre sur les données de la condition d'orientation de l'écran verticale.

[13] L'effet de la condition consigne de distance n'étant pas significatif sur l'ensemble des données, nous n'avons pas entré ce facteur dans notre analyse, et choisi de fusionner les groupes de différentes consignes de distance.

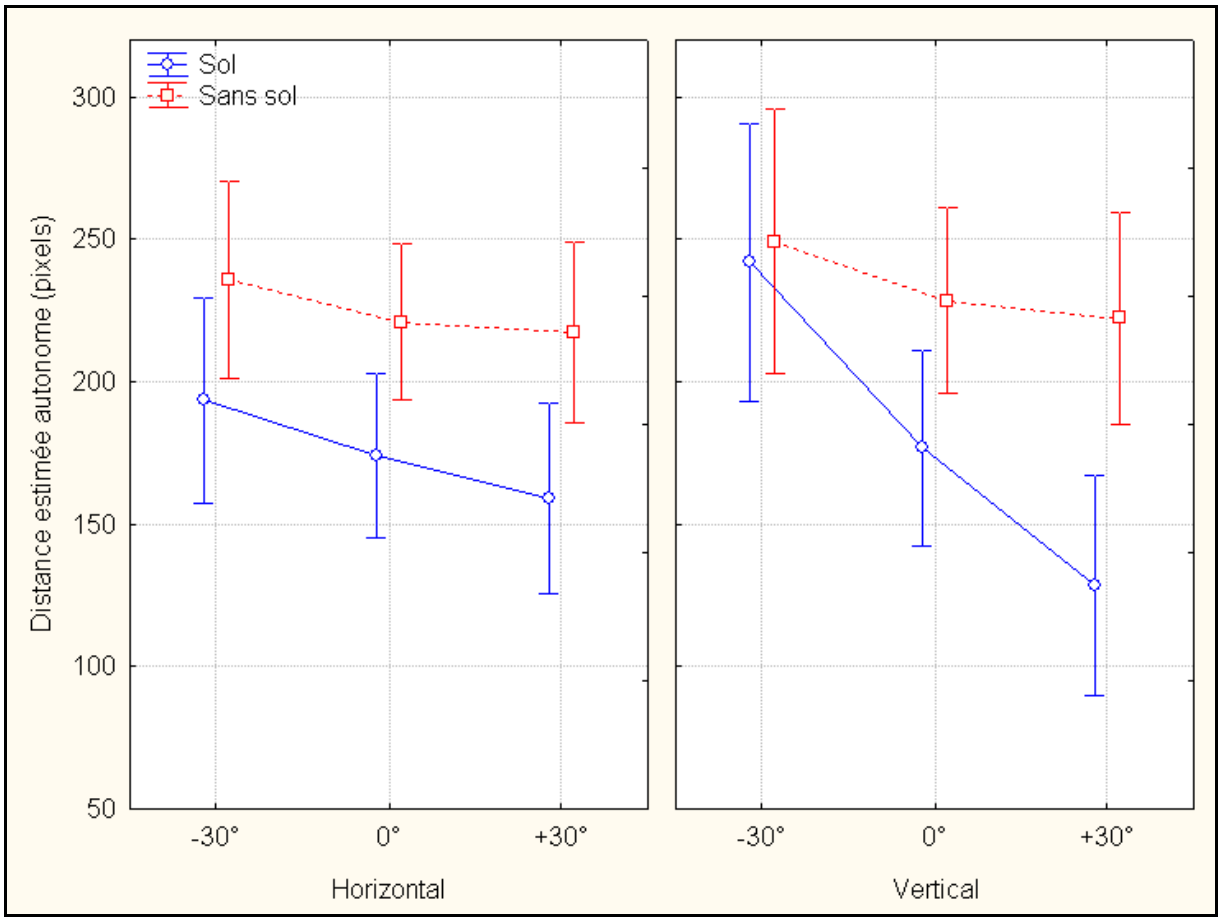


Figure 21 : Effet d'interaction Orientation de l'écran × Friction × Pente sur le RA observé.

Pour identifier l'origine des différences significatives mises à jour par ces deux ANOVAs, nous avons comparé en test post hoc les RA deux à deux par des t de student avec correction de Bonferroni plutôt que des comparaisons planifiées. La correction de Bonferroni est un test plus conservateur (permettant d'éviter les erreurs de type I, rejet erroné de l'hypothèse nulle) que les comparaisons planifiées consistant à diviser le seuil de significativité à atteindre par le nombre de comparaisons deux à deux à tester. Dans notre test, le nombre de comparaison était de neuf au total[14], soit un seuil de significativité de 0.05/9 = 0.006 à atteindre pour que la différence soit considérée comme significative. Notre hypothèse était celle d'une interaction entre *pente* et *friction*, montrant un effet de la *friction*

[14] Pour chaque pente, comparaison de la performance dans la condition avec ou sans sol (3 comparaisons) et pour chaque condition de friction, comparaison de la performance entre chaque paire de pente (-30° et 0° ; -30° et +30° ; 0° et +30°) (6 comparaisons), soit en tout 9 comparaisons deux à deux.

plus prononcé pour certaines pentes que d'autres lorsque l'écran est orienté verticalement, alors que lorsque l'écran est orienté horizontalement, notre hypothèse est de ne trouver qu'un effet principal de la condition *friction* (classique lorsque le stimulus se déplace le long d'une ligne, e.g., Hubbard, 1995).

Pour la condition d'*écran horizontal*, l'interaction Friction × Pente n'est pas significative, $F(2, 96) = 1.11$, $p > .05$, ce qui montre que l'interaction double trouvée sur l'ensemble des données ne provient pas de la condition d'*écran horizontal*. Par contre, pour la condition d'*écran vertical*, l'interaction Friction × Pente est significative, $F(2, 96) = 12.15$, $p < .05$, confirmant notre hypothèse d'un effet de la friction dépendant de la pente lorsque l'écran est orienté verticalement. Les t de student avec correction de Bonferroni (Tableau 2) nous montrent deux différences significatives : premièrement, le RA est significativement différent entre les conditions *sol* et *sans sol* lorsque la pente est de +30° ; ensuite, le RA est significativement différent entre les conditions de pente -30° et +30° dans la condition *sol*, montrant une influence de la gravité sur le jugement du RA.

Tableau 2 : Différences significatives entre les conditions deux à deux mises en évidence par des t de student avec correction de Bonferroni. En rouge sont écrites les conditions statistiquement différentes (i.e., si p < 0.006).

Effet de la friction sur la pente		Effet de la pente sur la friction			
Condition *sol* vs. *sans sol*			-30° vs. 0°	0° vs. +30°	-30° vs. +30°
-30°	t(48) = -0.22, p = 0.82	Sol	t(46) = 2.23, p = 0.03	t(46) = 2.32, p = 0.025	t(46) = 3.95, p = 0.0003
0°	t(48) = -2.28, p = 0.03	Sans sol	t(50) = 0.77, p = 0.44	t(50) =0.23, p = 0.82	t(50) = 0.92, p = 0.36
+30°	t(48) = -3.71, p = 0.0005				

Les résultats de cette expérience montrent clairement que le RA du lanceur est estimé sur la base de certains facteurs physiques tels que l'influence de la gravité (orientation de l'écran et pente) et la présence de friction (sol ou sans sol). En particulier, nous avons montré qu'en présence de friction, la pente sur laquelle se déplace l'objet modifie significativement

ce RA lorsque l'écran est orienté verticalement, c'est-à-dire lorsque la gravité a son effet dans le même plan que le mouvement, mais que la pente n'a pas d'effet lorsque l'écran est orienté horizontalement, c'est-à-dire lorsque la gravité a son effet orthogonal au plan du mouvement du carré. L'absence d'effet de la pente lorsque le carré se déplace sans friction sur l'écran vertical nous indique que les participants se représentent la scène visuelle différemment en l'absence de sol. En effet, sur Terre, tout objet sans support tombe du fait de la gravité. Or, dans la scène visuelle de la condition *sans sol* et *écran vertical*, le carré continue de se déplacer en ligne droite. La gravité semble donc absente de la scène visuelle. Les participants considéreraient donc que puisque la trajectoire de l'objet est rectiligne, c'est qu'il n'y a pas de gravité dans la stimulation visuelle et qu'en conséquence le RA ne varie pas selon la pente sur laquelle se déplace l'objet.

Cependant, même si les résultats sont cohérents avec une utilisation de certains principes de la physique dans l'action du RA du lanceur, d'autres principes n'ont pas d'effet sur les réponses. En effet, l'ANOVA n'a révélé aucun effet de la consigne de distance. La non-utilisation d'une telle information, malgré son effet théorique sur le RA du lanceur (voir Figure 17), pourrait démontrer que la prise en compte des principes de la physique que sont la gravité et la friction se fait de manière qualitative mais non quantitative. Cela signifierait que si les participants utilisent certaines connaissances sur la gravité et la friction dans leur jugement, ils ne calculent pas pour autant sur un mode quantitatif les effets sur le déplacement de la cible. Cependant, une autre hypothèse reste possible pour expliquer les performances des participants, à savoir que les participants n'utilisent pas la consigne de distance donnée avant chaque essai, mais une distance qui leur est propre pour calculer les effets des différentes forces de la physique. Ainsi, tout en n'utilisant pas la distance imposée par les consignes, les participants utiliseraient malgré tout des calculs prenant en compte une distance à la scène subjective pour déterminer le rayon d'action du lanceur. Afin de vérifier cette

interprétation, nous avons calculé quelles auraient du être les résultats si les participants avaient effectivement estimé le RA sur un mode quantitatif.

2.1.4 Modélisation des données

Dans cette partie, nous avons voulu déterminer si les réponses des participants résultaient de l'utilisation d'une distance à la scène subjective, différente de la consigne de distance donnée, associée à une valeur de gravité constante selon la pente suivie par l'objet, et si cette valeur de gravité correspondait à la gravité terrestre (9.81 m/s²). Pour cela, nous nous sommes intéressés aux réponses données dans les conditions *écran vertical* avec *sol*, pour toutes les consignes de distance et de pente.

Dans un premier temps, nous avons voulu vérifier si les participants utilisaient une distance à la cible perçue ($D_{Scène}$ subjective) correspondant à la consigne donnée pour les conditions 15 m ou 1500 m, ou déterminer quelle est $D_{Scène}$ subjective lorsqu'aucune consigne n'était donnée.

En fixant arbitrairement la masse du lanceur et de la cible à 1 Kg, nous avons tout d'abord cherché à déterminer quelle distance perçue ($D_{Scène}$ subjective) entre le participant et la scène virtuelle était utilisée, et si celle-ci correspondait à la consigne donnée avant chaque essai. Pour cela, nous avons calculé $D_{Scène}$ subjective dans la condition 0° en faisant l'hypothèse que les participants utilisaient dans cette condition une gravité de 9.81 m/s², ceci pour différentes valeurs de frottement (μ = 0.1 ; 0.5 ; 1.0 ; 1.3 et 1.8) [15] (voir Annexe B pour la méthode de calcul de $D_{Scène}$).

[15] Le facteur de frottement est une grandeur qui varie très fortement en fonction de très nombreux paramètres : état de surface et lubrification évidemment, mais aussi vitesse, pression, temps de maintien en charge, etc. On relève les ordres de grandeur suivants : 0,1 à 0,2 pour la plupart des métaux dans l'air avec les lubrifiants usuels

Nous avons ensuite considéré que la même $D_{Scène}$ subjective était utilisée dans les conditions -30° et +30°. Etant donné $D_{Scène}$ subjective, nous avons appliqué le raisonnement inverse et calculé la valeur de la gravité utilisée dans le jugement du RA selon différentes valeurs de frottement μ.

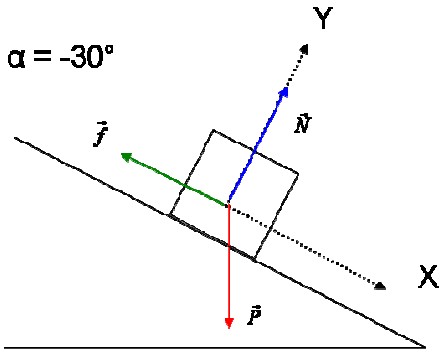
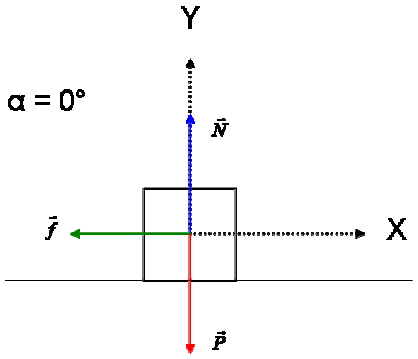
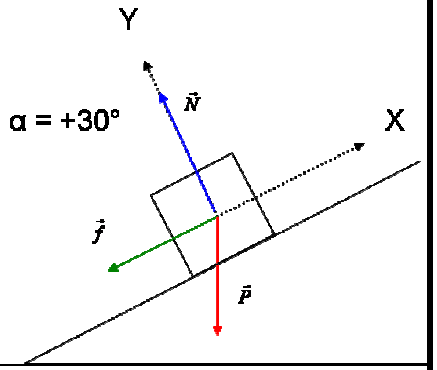
Enfin, la consigne donnée aux participants était de cliquer sur le lieu où le mouvement de la cible semble devenir autonome. Pour les conditions de pente 0° et +30°, la réponse des participants indiquait que la cible aurait dû s'arrêter, et que le maintien de sa vitesse constante dans son déplacement reflétait un déplacement autonome. La réponse des participants signalait donc une absence anormale d'arrêt de la cible. Nous avons considéré que la réponse des participants correspondait à la détection d'une vitesse observée différente de 100% de la vitesse attendue[16]. Dans ce cas, la cible continuait de se déplacer alors qu'elle aurait dû s'arrêter. Pour finir, dans la condition -30°, deux situations physiques sont possibles. Dans une première situation, la force de gravité est supérieure aux frottements et la cible accélère (hypothèse -30°acc). Dans la deuxième situation, la force de gravité est inférieure aux frottements et la cible doit décélérer (hypothèse -30°dec). Nous avons donc calculé la gravité utilisée par les participants pour chacune de ces hypothèses (Tableau 3).

(huile) ; 0.5 pour un frottement d'un objet en bois sur du métal ; 0,3 à 1 pour le frottement de deux métaux non préparés dans l'air, à sec. Source : http://fr.wikibooks.org/wiki/Tribologie_-_Facteurs_de_frottement

[16] Nous avons aussi testé un modèle pour lequel la réponse des participants indiquait une absence anormale de décélération de l'objet, c'est-à-dire que la vitesse observée de l'objet différait de sa vitesse attendue. Nous avons considéré que la réponse des participants signalait une vitesse observée différente de 15% de la vitesse attendue. Cependant, les deux modèles 15% et 100% ne modifient que la valeur de la distance utilisée par les participants, mais dans un rapport linéaire. De ce fait, l'évolution de la distance utilisée en fonction de la consigne de distance à la scène virtuelle et de μ est strictement la même quel que soit le modèle utilisé, et les résultats de l'ANOVA sont absolument identiques quel que soit le modèle (même dll, même F, même p). De plus, la valeur de la gravité utilisée ne varie pas selon le modèle appliqué, car la gravité utilisée est calculée à partir de la condition 0° dans laquelle nous faisons l'hypothèse que les participants utilisent une gravité de référence de 9.81 m/s². Les résultats sont donc strictement identiques quelle que soit la variation de vitesse détectée. Nous ne présenterons donc ici que les résultats du modèle 100%.

Tableau 3 : Calcul de la gravité utilisée par les participants dans leur estimation du RA du lanceur sur la cible.

Forces représentées dans la situation : $\vec{P} = m\vec{g}$; $\vec{N}$; et $\vec{f} = \mu\vec{N}$.

		
Valeur de la gravité :	Valeur de la gravité :	Valeur de la gravité :
Si le carré décélère : $g = \frac{a}{Sin30 - \mu.Cos30}$ Si le carré accélère : $g = \frac{a}{-Sin30 + \mu.Cos30}$	$g = \frac{a}{\mu}$	$g = \frac{a}{Sin30 + \mu.Cos30}$

1) On connaît Δt grâce à la position du clic : $\Delta t = \frac{\sqrt{(Xobs^2 + Yobs^2)}}{Vobs}$ [1],

2) Δt correspond aussi à une variation de vitesse perçue (attendue) : $\Delta V = Vobs - Vatt = S.Vobs$ [2]. Donc,

3) $Vatt = Vobs - S.Vobs = Vobs.(1 - S)$ [3] si le participant attend une décélération de l'objet [$Vatt = Vobs.(1 + S)$ si le participant attend une accélération]. De plus,

4) $Vatt = Vobs - a.\Delta t$ [4]. En combinant [3] et [4], nous obtenons donc :

5) $a_{obs} = \frac{S.Vobs}{\Delta t}$. Pour convertir cette valeur d'accélération observée en valeur réelle (m/s²), il faut multiplier le tout par le rapport ($D_{Scène}$ subjective / D_{Ecran}). De ce fait,

6) $a = \frac{S.Vobs}{\Delta t} \times \frac{D_{Scène}subjective}{D_{Ecran}}$. Connaissant a, et en utilisant un modèle physique (cf. Figures ci-dessus) et la seconde loi de Newton, nous pouvons déduire la gravité utilisée par les participants.

Légende :

a : valeur absolue de l'accélération de l'objet. Par convention, l'objet accélère de a et décélère de $-a$

Xobs et Yobs : coordonnées en X et Y du lieu du clic

Vobs : vitesse de la cible à l'écran.

Vatt : vitesse attendue de la cible

S : pourcentage de variation de vitesse détectée par les participants (15% ou 100%) et utilisée pour répondre

Δt : temps de parcours de la cible avant que le participant ne perçoive une différence entre la vitesse observée de la cible et la vitesse attendue

$D_{Scène}$ subjective: distance entre le point d'observation et la scène virtuelle utilisée par les participants

D_{Ecran} : distance réelle entre les participants et l'écran de l'ordinateur

Dans une première ANOVA, nous avons analysé $D_{Scène}$ subjective pour connaître la distance utilisée par les participants pour se représenter la scène visuelle pour les trois groupes de distance. L'ANOVA a été réalisée selon le plan S⟨Consigne de distance (3)⟩ ×Force de frottement (5) avec *Consigne de distance* (Pas de consigne vs. 15 m vs. 1500 m) en facteur inter sujet et *Force de frottement* (μ = 0.1 ; 0.5 ; 1.0 ; 1.3 et 1.8) en facteur intra sujet.

Nous avons analysé ensuite dans une seconde ANOVA la gravité utilisée par les participants dans leur jugement du RA, selon le plan S⟨Consigne de distance (3)⟩ ×Force de frottement (5) × Hypothèses cinématiques (3), avec *Consigne de distance* (Pas de consigne vs. 15 m vs. 1500 m) en facteur inter sujet et *Force de frottement* (μ = 0.1 ; 0.5 ; 1.0 ; 1.3 et 1.8) et Hypothèses cinématiques (+30° décélère vs. -30° décélère vs. -30° accélère) en facteur intra sujet. Pour tous les tests statistiques, un seuil de significativité alpha de .05 a été utilisé et des tests post hoc de Newman-Keuls ont été réalisés pour identifier l'origine des différences significatives.

Les résultats ne montrent pas d'effet de la consigne de distance sur $D_{Scène}$ subjective, $F(2, 21) < 1$. La distance dépend par contre de la valeur de frottement μ utilisée dans notre modèle, $F(4, 84) = 118.23$, $p < .05$, le test post hoc nous montrant que la distance utilisée est systématiquement différente lorsqu'on change de μ. Enfin, l'ANOVA ne signale aucun effet d'interaction Consigne de distance × Force de frottement, $F(8, 84) < 1$ (Figure 22).

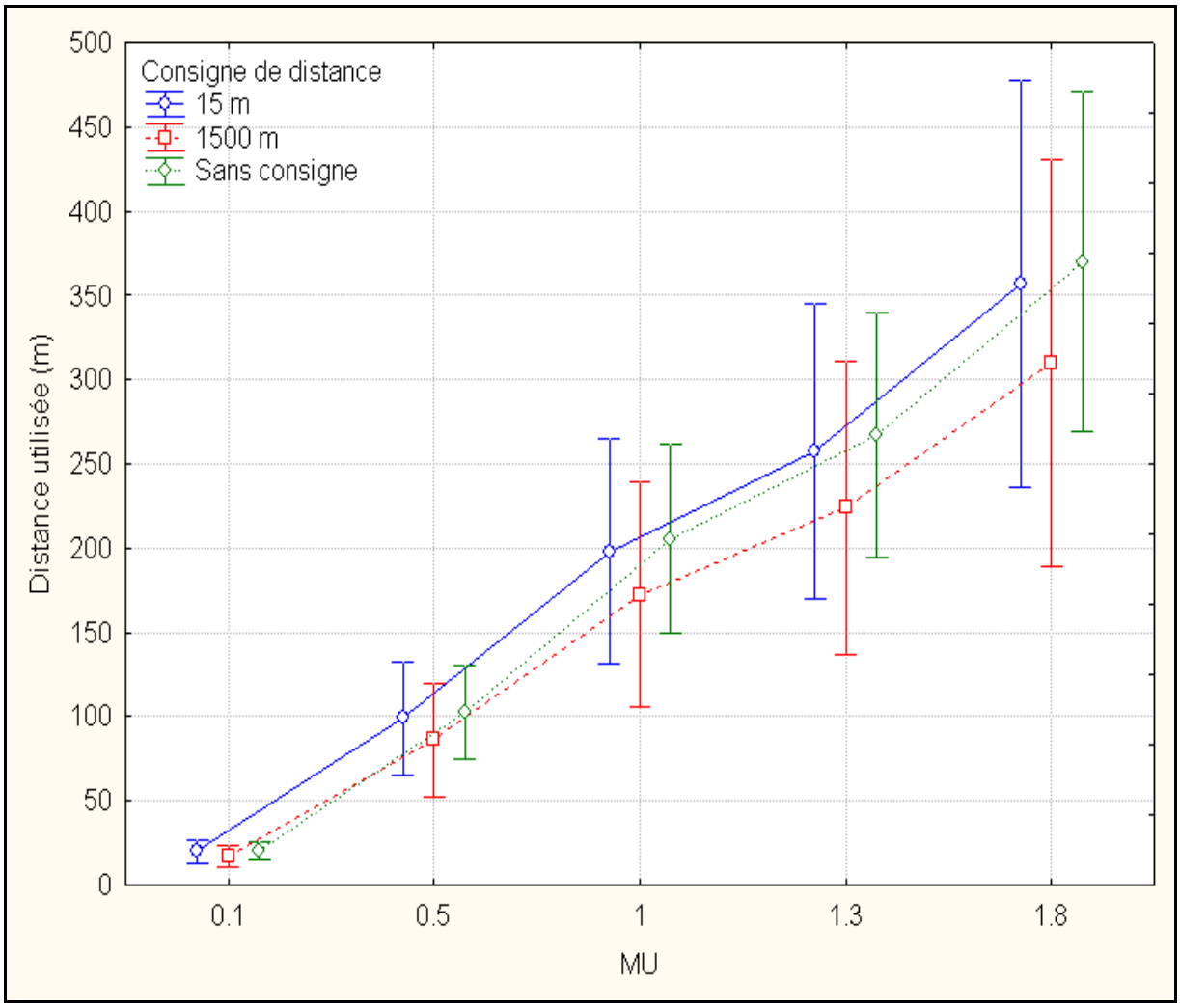


Figure 22 : Distance utilisée par les participants calculée dans la condition 0° indépendamment de la consigne de distance à la scène virtuelle (sous l'hypothèse que dans la pente à 0° une gravité de 9.81 m/s² soit utilisée), en fonction des valeurs de frottement μ utilisées dans notre modélisation.

L'ANOVA réalisée sur la gravité utilisée par les participants montre un effet d'interaction Force de frottement × Hypothèses cinématiques, $F(8, 168) = 347.62$, $p < .05$. Cette interaction (Figure 23) nous montre que lorsque μ est faible (0.1), la gravité est sous estimée, pour une valeur de l'ordre de 2 à 3 m/s², et que les participants se représentent la cible dans la condition -30° comme devant accélérer. Néanmoins, il semble difficile de trouver une valeur de μ pour laquelle la valeur de la gravité serait similaire entre les conditions -30°acc et +30° dec. Lorsque μ adopte une valeur importante (1.3 ; 1.8), la gravité est légèrement surestimée, de l'ordre de 12 à 13 m/s². Pour ces valeurs de μ, les participants se

représenteraient le carré dans la condition -30° comme devant décélérer, et il semble possible de trouver une valeur de µ pour laquelle la gravité utilisée serait similaire dans les conditions -30°acc et +30° (Figure 23).

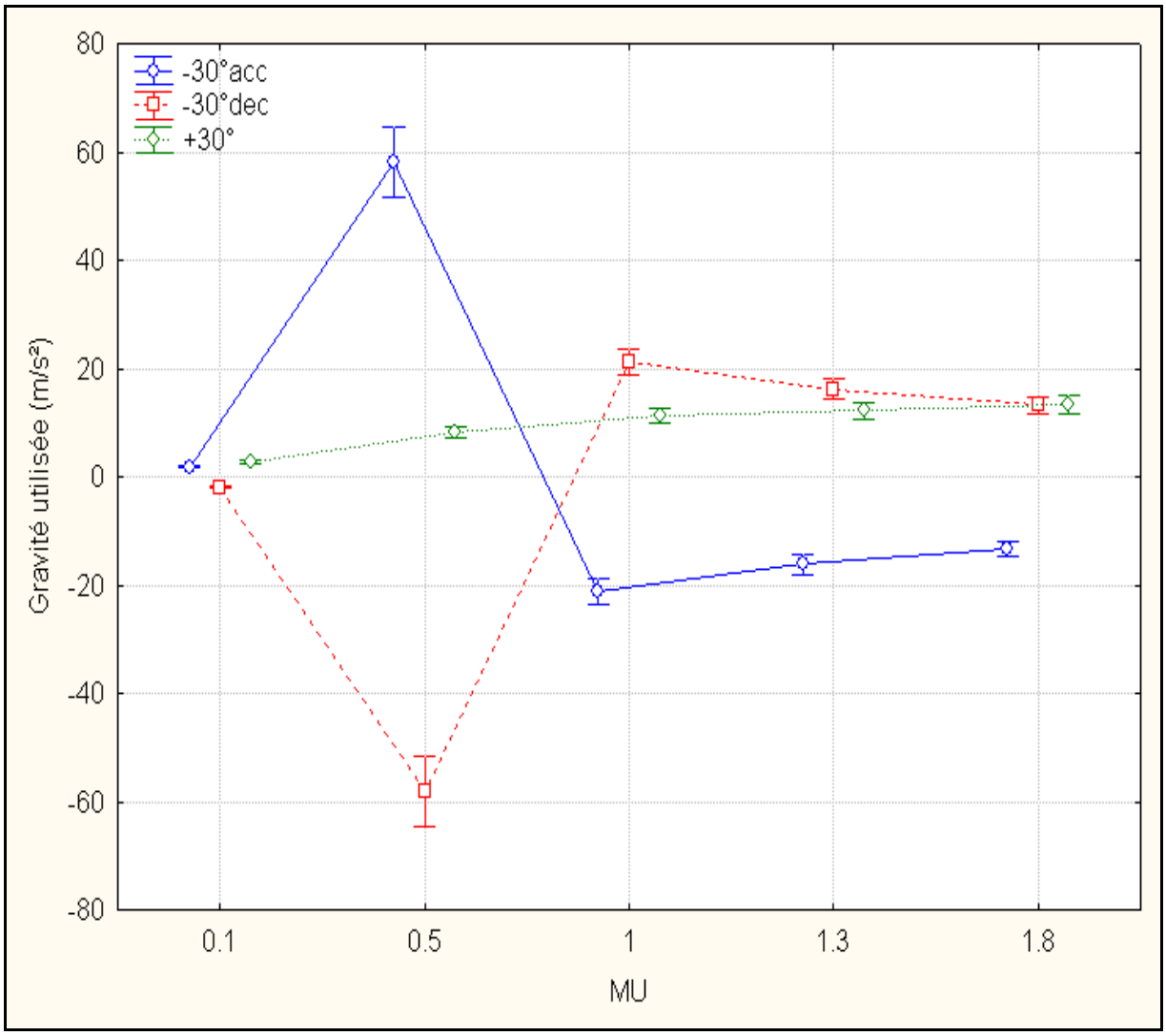


Figure 23 : Evolution de la gravité subjective à partir de $D_{Scène}$ subjective calculée pour différentes valeurs de frottement µ et les hypothèses cinématiques. Pour un µ élevé (>0.5), il est possible d'identifier une valeur similaire de gravité utilisée pour les conditions -30°dec et +30°dec.

Cependant, la valeur de µ pour laquelle la gravité est similaire dans les conditions -30°dec et +30°dec est très importante, sortant de la gamme habituelle des coefficients de frottement allant généralement de 0 à 1. Ainsi, pour obtenir des valeurs de gravité similaires

et proches de la gravité réelle, il aurait fallu utiliser d'après notre modèle une valeur de μ certainement plus importante que celle que se représentent les participants. La valeur du coefficient de frottement ne correspondant à aucune réalité physique (ou tout au moins à aucune réalité physique habituelle), l'utilisation par les participants d'un tel modèle physique quantitatif est peu probable.

Enfin, nous avons comparé les réponses des participants avec la réponse idéale, c'est-à-dire l'endroit précis où les participants auraient dû cliquer s'ils utilisaient une valeur de gravité de 9.81 m/s² exactement. Dans un premier temps, nous avons déterminé cette réponse idéale en fonction de la distance visuelle à la scène propre à chaque participant calculée dans la condition 0°. Nous avons ensuite calculé l'endroit précis où la cible aurait dû s'arrêter selon cette distance d'observation pour les conditions de pentes de -30° et +30°, sous l'effet d'une gravité de 9.81 m/s² et pour les différentes valeurs de μ. Cependant, notre modélisation faisant l'hypothèse que les participants utilisent une valeur de gravité de 9.81 m/s² dans la condition 0°, cette condition fixe $D_{Scène}$ subjective et donne une valeur de RA de référence indépendamment de la consigne de distance et ne permet donc pas ce calcul. Dans un deuxième temps, nous avons fait les mêmes calculs pour la consigne de distance donnée (15m ou 1500 m) avant chaque essai, cette fois-ci pour les différentes valeurs de μ et toutes les conditions de pente puisque la distance à la scène visuelle est fixée par la consigne et non inférée des résultats de la condition 0°.

Lorsque la distance à la scène est libre, les résultats nous montrent que la réponse des participants est éloignée de la réponse idéale lorsque μ est faible (0.1 ; 0.5) mais se rapproche de la réponse idéale dans la condition +30° lorsque la valeur de μ est élevée (1 ; 1.3 ; 1.8). Cependant, dans la condition -30°, la réponse des participants reste toujours très éloignée de la réponse idéale quelle que soit la valeur de μ (Figure 24).

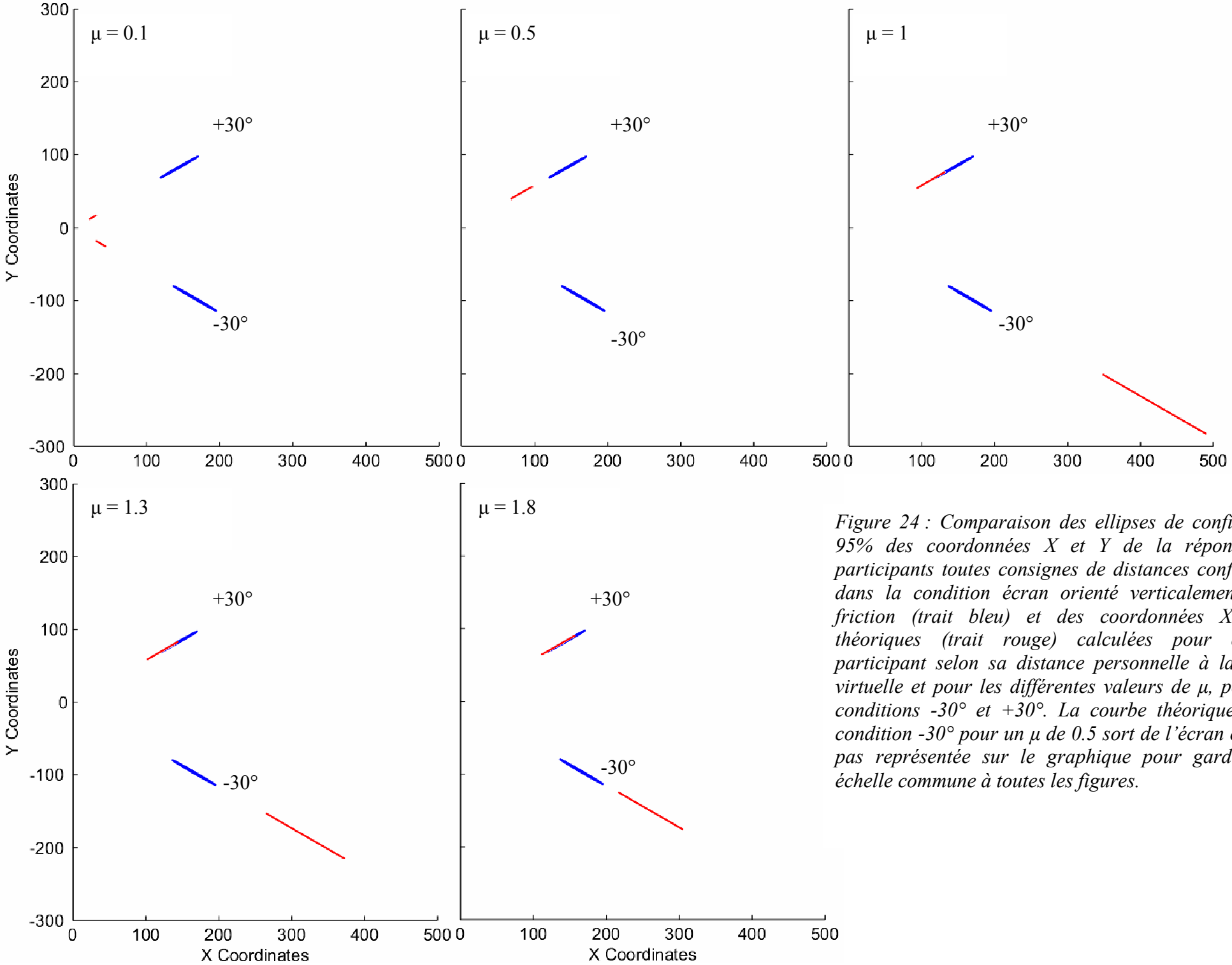


Figure 24 : Comparaison des ellipses de confiance à 95% des coordonnées X et Y de la réponse des participants toutes consignes de distances confondues dans la condition écran orienté verticalement avec friction (trait bleu) et des coordonnées X et Y théoriques (trait rouge) calculées pour chaque participant selon sa distance personnelle à la scène virtuelle et pour les différentes valeurs de μ, pour les conditions -30° et +30°. La courbe théorique de la condition -30° pour un μ de 0.5 sort de l'écran et n'est pas représentée sur le graphique pour garder une échelle commune à toutes les figures.

Lorsque la distance à la scène est fixée par la consigne de distance, les résultats montrent que les réponses des participants sont compatibles avec les réponses théoriques uniquement pour les conditions de pente 0° et -30° mais pour deux valeurs de μ différentes (respectivement 0.1 et 0.5 pour une pente de 0° et -30°) dans la condition 15m. Par contre, les réponses des participants sont très différentes des réponses théoriques dans la condition 1500 m quelques soient les valeurs de μ (Figure 25).

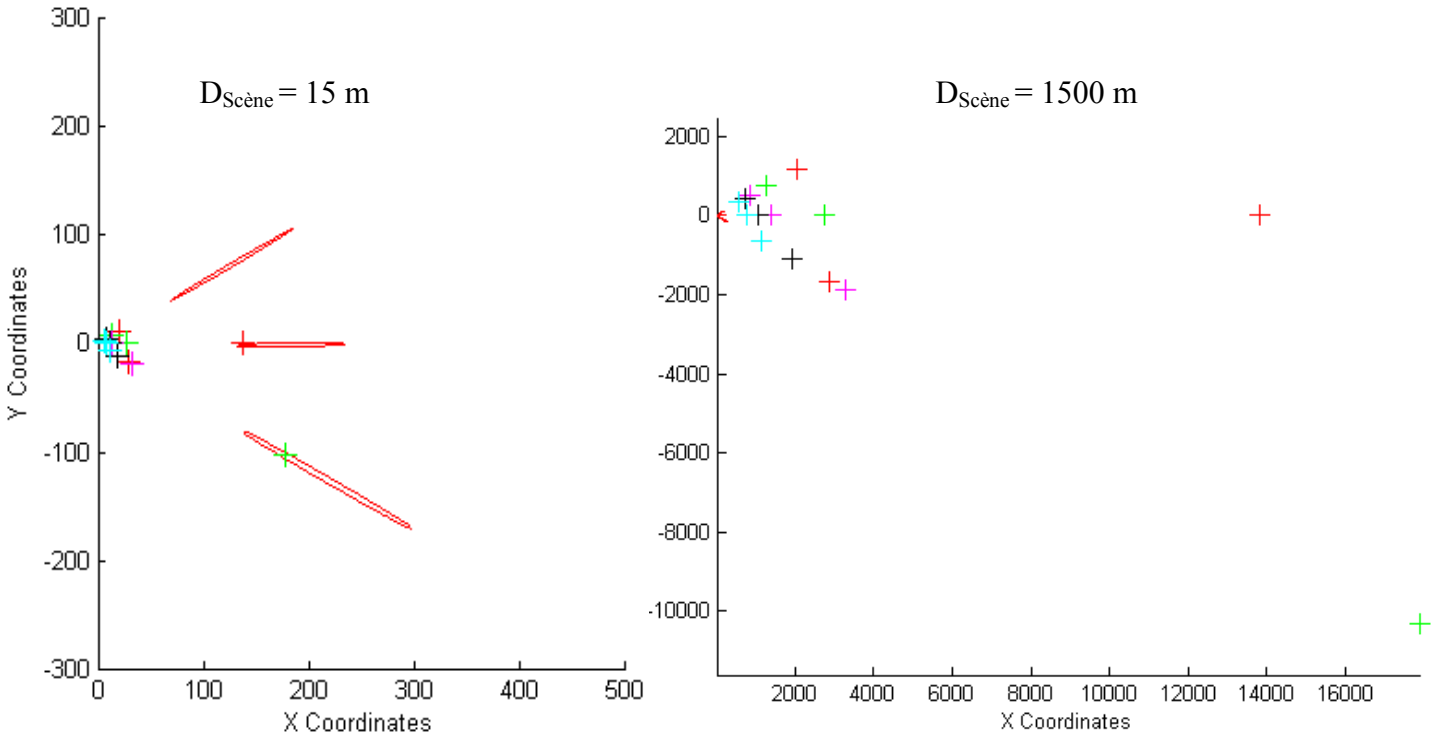


Figure 25 : Représentation des ellipses de confiance à 95% des réponses des participants (en rouge) et des rayons d'action théorique de la cible, pour une distance d'observation de 15 m (figure de gauche) et 1500 m (figure de droite), et pour les différentes valeurs de μ (croix rouge :μ = 0.1 ; croix verte μ = 0.5 ; croix magenta μ = 1 ; croix noire μ = 1.3 ; croix cyan μ = 1.8). La réponse théorique est incluse dans l'ellipse de confiance des participants uniquement dans la condition 15 m pour un μ de 0.1 pour une pente de 0° et pour un μ de 0.5 pour une pente de -30°

Ce résultat confirme que les participants n'utilisent pas les différentes forces physiques pour calculer le rayon d'action du lanceur, mais uniquement de manière qualitative pour déterminer l'effet global des différentes forces. Ainsi, les participants n'utilisent ni la consigne de distance, ni une connaissance exacte de la gravité terrestre ni même une valeur de frottement constante.

Cependant, notre modèle fait l'hypothèse que la réponse des participants correspond à un temps de parcours de la cible ($\triangle t$ dans notre modélisation) avant que le participant ne perçoive une différence entre la vitesse observée de la cible et la vitesse attendue. Nous transformons donc dans notre modèle la réponse spatiale (RA du lanceur) des participants en une réponse temporelle (temps d'action du lanceur). Nous avons donc conduit une expérience contrôle pour nous assurer que cette transformation de la réponse ne modifiait pas les résultats. Celle-ci confirme que notre transformation du RA en $\triangle t$ ne modifie en rien notre modélisation (voir la partie expérimentations contrôles pour plus de détails).

2.1.6 Conclusions

Les résultats de l'expérience 1 et du modèle de la physique testé montrent donc dans un premier temps que les participants utilisent des informations sur les différentes forces s'appliquant au mouvement d'un objet pour juger le rayon d'action du lanceur sur l'objet lancé par collision, comme l'effet de la gravité et la présence de frottements. Les différentes forces contribuant ou s'opposant au mouvement de l'objet lancé contraignent donc bien notre perception. Alors même que la scène est virtuelle et que les objets de cette scène ne sont pas réellement soumis aux lois de la physique, cette expérience démontre que les observateurs « injectent » d'eux-mêmes ces lois de la physique dans la scène visuelle, et les appliquent pour interpréter le mouvement des objets.

Cependant, l'utilisation de ces différentes forces ne donne pas lieu à un calcul du RA du lanceur sur la cible sur la base des lois de la physique. En revanche, les résultats démontrent que les différentes forces sont prises en compte de manière qualitative, sous la forme d'une information heuristique : plus l'effet implicite de la gravité est important (pente de déplacement à +30° et l'orientation verticale de l'écran), plus le RA est court. Les participants jugeraient donc le RA en combinant qualitativement les effets de ces différents facteurs.

2.2 Expérimentation 2

Dans une deuxième expérimentation, nous nous sommes intéressés à l'utilisation d'un modèle interne de la gravité pour juger l'accélération d'une balle. Plus précisément, nous avons voulu étudier la précision de l'estimation de la gravité, après avoir fait rebondir une balle ou observé un rebond de balle soumise à différentes accélérations.

2.2.1 Problématique

Il est maintenant bien établi que l'observation de la performance d'un autre individu peut aider notre propre performance (e.g., Heyes & Foster, 2002 ; Mattar & Gribble, 2005). On parle d'apprentissage par le modèle ou transfert perception-action (TPA, Hecht, Vogt & Prinz, 2001). Cependant, un petit nombre d'études s'est intéressé à la relation inverse, à savoir si une action motrice peut améliorer notre perception. Cette hypothèse a été étudiée tardivement, et des exemples de transfert action-perception (TAP) ont été démontrés entre des tâches motrices et visuelles consistant à produire ou juger des mouvements synchronisés (Hecht et al., 2001).

Récemment, Creem-Regehr, Gooch, Sahm et Thompson (2004) ont mis à jour un exemple d' « embodiment », c'est-à-dire d'une inscription corporelle de la perception. Dans une série de quatre expériences utilisant une interface de locomotion semi-immersive (marche sur un tapis roulant combinée à une projection sur trois écrans de la stimulation visuelle, avec utilisation d'un gilet de retour d'effort pour simuler les effets biomécaniques de la pente virtuelle), les participants devaient indiquer le degré d'inclinaison de la pente d'une colline (jugement verbal), ajuster une ligne sur un disque pour que celle-ci corresponde à la pente de la colline (jugement visuel), ou incliner une planche avec leur main dominante sans la voir pour que l'inclinaison de la planche corresponde à l'inclinaison de la colline (jugement haptique). Dans l'expérience 1, les participants et le point d'observation étaient stationnaires,

tandis que dans l'expérience 2, les participants étaient virtuellement déplacés au sommet de la colline sans expérimenter aucune force biomécanique. Dans les expériences 3 et 4, les participants étaient placés sur un tapis roulant et se déplaçaient pour grimper la colline, mais en ressentant les forces correspondantes à un déplacement sur un terrain plat (expérience 3) ou les forces proportionnelles à la pente de la colline (expérience 4). Les résultats ne montrent tout d'abord aucune différence entre les expériences 1 et 2, quel que soit le type de jugement. Cependant, les résultats mettent aussi en évidence une surestimation de la pente dans les jugements verbaux et visuels dans l'expérience 4 comparée à l'expérience 3. Les auteurs en concluent que les participants combinent à la fois des informations visuelles et biomécaniques pour estimer la pente de la colline dans des jugements verbaux ou visuels, confirmant l'effet de l'action sur la perception. Cette étude confirme les résultats de Bhalla & Proffitt (1999) montrant que des changements dans le potentiel physiologique (e.g., fatigue des participants, âge) ou le potentiel d'action (ici grimper une colline, par exemple en portant un sac à dos lourd) influence la perception consciente de la pente d'une colline. En revanche, aucune différence n'est apparue dans le jugement haptique entre les expériences 3 et 4, suggérant que le système moteur n'utilise que les informations visuelles pour réaliser une estimation haptique. Il convient donc de se demander comment la réalisation d'une action motrice peut influencer ensuite l'observation de cette même action.

Pour répondre à cette interrogation, plusieurs modèles ont été proposés, et notamment les modèles directs (forward) du contrôle moteur qui incluent une prédiction des conséquences sensorielles d'une action (Wolpert et al., 2001 ; Grush, 2004) (Figure 26). Selon le modèle MOSAIC[17] (Wolpert, Doya & Kawato, 2003), le cerveau générerait de multiples modèles directs pour simuler les différents effets de l'environnement. Selon

[17] Modular Selection And Identification for Control (Wolpert et al., 2001).

l'exemple de Wolpert et al. (2003), lorsque quelqu'un cherche à soulever une bouteille, qui peut être vide ou pleine, une copie d'efférence est générée pour simuler les conséquences sensorielles de l'action pour ces deux hypothèses. La prédiction basée sur l'hypothèse d'une bouteille vide énonce que celle-ci sera soulevée vite, alors que la prédiction basée sur l'hypothèse d'une bouteille pleine énonce qu'elle sera soulevée plus lentement. Ces prédictions sont ensuite comparées aux feedbacks ressentis par l'individu. La prédiction correspondant au feedback renseigne alors sur les caractéristiques de la bouteille. Le même modèle pourrait être utilisé lorsque l'individu observe l'action. L'observateur transformerait d'abord l'information visuelle (le mouvement du membre soulevant la bouteille) en une entrée pour la commande motrice, et cette entrée serait utilisée pour prédire les conséquences sensorielles de l'action motrice. Enfin, l'observateur comparerait les conséquences sensorielles prédites avec celles observées.

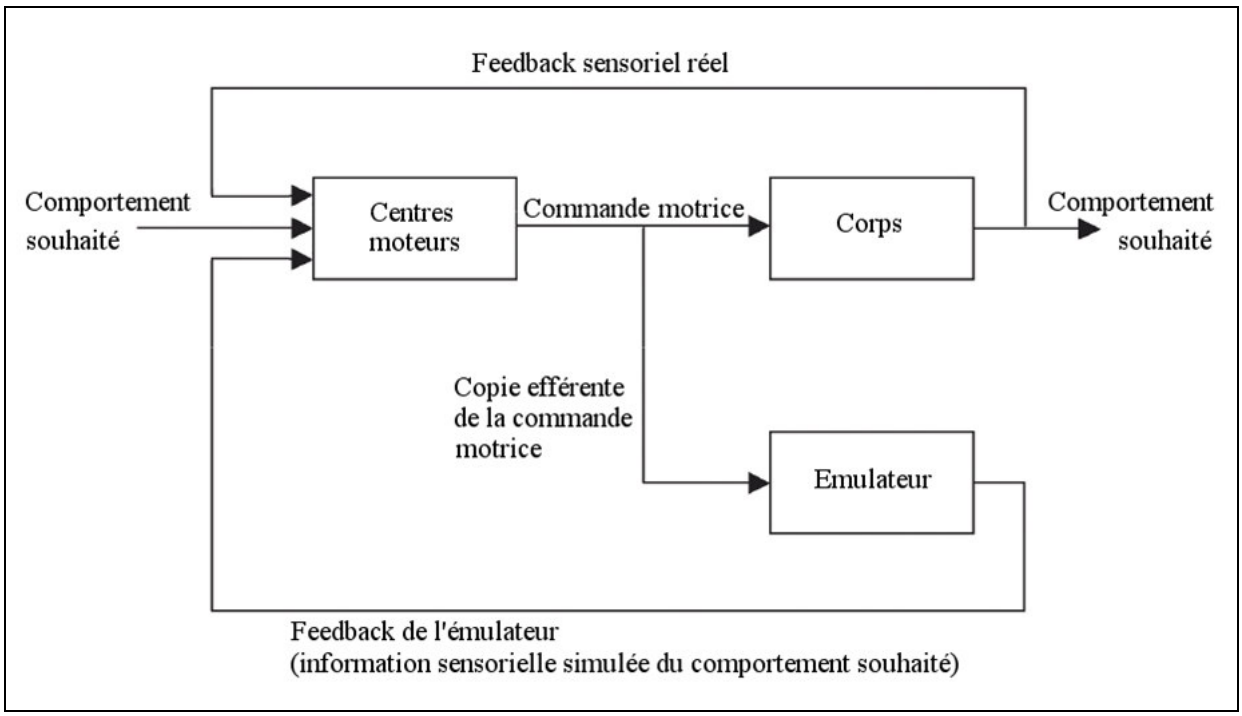


Figure 26 : Modèle d'émulateur selon Grush (2004), modifié par Michel-Ange Amorim. Lors de la génération de la commande motrice, une copie du signal (copie d'efférence) est envoyée vers un émulateur permettant de simuler et prédire les conséquences de la commande motrice avant et/ou en parallèle des feedbacks sensoriels réels.

Sur la base de ces modèles directs ou d'émulation, nous pouvons penser que l'amélioration de la perception par l'action pourrait émerger de la prédiction du système moteur ou de mécanismes d'émulation (Grush, 2004).

Cependant, pour cette même tâche, on peut envisager une autre conception reposant sur les théories écologiques (Gibson, 1979). Ces théories présentent également l'action comme déterminante de la perception. Ainsi, si la production du mouvement est généralement considérée comme le résultat d'une loi de contrôle (Warren, 1988) qui permet d'exploiter une information pour une action sous la forme de la relation suivante : $\Delta F_{int} = K\ (\Delta Information)$, dans laquelle ΔF_{int} correspond au changement de force produit par l'individu, K est une constante modulatrice et ΔInformation représente le flux d'information, il est aussi possible d'envisager une relation inverse dans laquelle les forces produites par l'action génèrent une information. Cette information pourrait servir de variable d'ajustement pour produire une action adaptée par un mécanisme de régulation circulaire (Figure 27). Pour reprendre l'exemple de la bouteille vide ou pleine, le changement de flux optique produit par l'action, comparé au changement de force renseignerait sur les caractéristiques de la bouteille : pour un niveau de force donné, un mouvement de la bouteille rapide indiquerait que celle-ci est légère donc vide, et au contraire un mouvement plus lent signifierait que celle-ci est lourde et donc pleine.

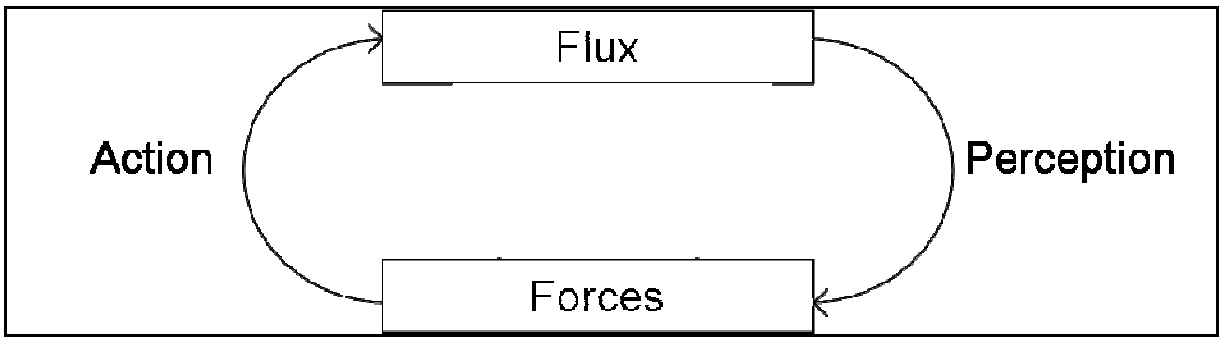


Figure 27 : Influence réciproque de la perception et de l'action. Un changement de force entraine un changement de flux, utilisé à son tour pour réguler les forces.

Chapitre 2 : Gravité et tâches et jugement

Nous avons voulu vérifier si une amélioration de la perception grâce à l'action se produisait dans une tâche d'estimation de l'accélération d'une balle en chute libre. Dans ce type de tâche, combiné avec le modèle MOSAIC ou d'émulation, le modèle interne de la gravité pourrait prédire le TTC d'une balle en chute libre pour une accélération gravitaire (TTCg), et comparer cette estimation au TTC réel de la balle. Si celui-ci est supérieur à TTCg, alors cela signifierait que l'accélération est inférieure à la gravité. Si le TTC réel est inférieur à TTCg, alors l'accélération de la balle est supérieure à la gravité terrestre. Cette estimation de l'accélération de l'objet devrait être précise du fait de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité, et indépendante de la tâche à accomplir, action ou observation. En effet, le modèle interne de la gravité n'utilisant pas de copie d'efférence de l'action motrice, aucune amélioration ne devrait être observée selon la tâche à accomplir. En revanche, l'absence de modèle interne de la gravité devrait mener à de meilleures performances lorsque les participants agissent plutôt que lorsqu'ils observent, puisque l'action (via la copie d'efférence ou la modification du flux optique) influence la perception. Ainsi, l'observation d'une amélioration de la performance grâce à l'action contredirait l'utilisation d'un modèle interne de la gravité, tandis qu'une performance élevée et identique dans la condition action et observation renforcerait l'hypothèse de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité.

2.2.2 Protocole expérimental

En collaboration avec Antoine Morice et Isabelle Siegler de l'université Paris Sud, nous avons donc voulu savoir si la perception visuelle de la gravité pouvait être améliorée par l'action. Dans cette expérience, 18 participants devaient juger si une accélération appliquée à une balle virtuelle de tennis de table était supérieure ou inférieure à la gravité terrestre. Un premier groupe de participants (N = 9) devaient tout d'abord réaliser la tâche d'action avant la

tâche d'observation (groupe *action–perception*), tandis que l'autre groupe (N = 9) réalisait les mêmes tâches mais dans l'ordre inverse (groupe *perception–action*). Nous avons voulu comparer l'estimation de la gravité dans la tâche d'action du groupe *action–perception* à l'estimation de la gravité dans la tâche de perception du groupe *perception–action*.

Dans la condition action, les participants devaient frapper avec une raquette virtuelle une balle virtuelle de tennis de table initialement fixe pour que celle-ci atteigne une hauteur prédéterminée et signalée par un trait rouge, placé à 40 cm du point de départ de la balle. Le mouvement de la raquette virtuelle était contrôlé par le déplacement d'une raquette réelle tenue par les participants dans leur main préférentielle, dont la position était enregistrée par un système de Flock of Birds©, et la stimulation visuelle était vidéo-projetée sur un écran de 1.25 × 2.5 m. Après avoir frappé la balle, les participants devaient regarder la balle se déplacer jusqu'à son sommet puis redescendre jusqu'à ce que celle-ci sorte de l'écran. Les participants devaient répéter trois fois cette frappe (il s'agissait d'un triplet), réalisée avec la même valeur d'accélération, puis répondre à la question « L'accélération de la balle était elle inférieure ou supérieure à la gravité terrestre ? ». Suite à leur réponse, l'accélération de la balle était changée, et les participants devaient réaliser un nouveau triplet. La valeur d'accélération appliquée à la balle virtuelle était constante au cours de chaque essai (pas d'effet de la résistance de l'air), comprise entre 1 à 18 m/s² par pas de 1 m/s², et variait selon un double escalier psychophysique pseudo-aléatoire, l'un des escaliers (ascendant) partant de 1 m/s² tandis que l'autre (descendant) partait de 18 m/s². Le double escalier pseudo-aléatoire consistait à alterner les essais de chaque escalier. Les valeurs d'accélération étaient fonction de la réponse des participants à la question à l'essai N-2. Si le participant avait répondu que l'accélération était inférieure à la gravité terrestre, nous augmentions alors l'accélération d'1 m/s², tandis que si sa réponse était que l'accélération était supérieure à la gravité terrestre, nous diminuions l'accélération d'1 m/s². L'expérience s'arrêtait après 12 changements de sens

dans chaque escalier, un changement de sens étant défini comme une augmentation de l'accélération suivie d'une diminution pour un même escalier (réponse à l'essai N-2 « l'accélération est inférieure à la gravité » puis réponse à l'essai N « l'accélération est supérieure à la gravité ») ou une diminution de l'accélération suivie d'une augmentation pour un même escalier (réponse à l'essai N-2 « l'accélération est supérieure à la gravité » puis réponse à l'essai N « l'accélération est inférieure à la gravité »). Le nombre d'essais et la valeur de l'accélération à chaque essai dépendaient donc entièrement des réponses des participants.

La tâche d'observation consistait en l'observation d'essais enregistrés réalisés par l'autre groupe. Les participants du groupe *perception–action* regardaient des essais issus de l'action du groupe *action–perception*, et inversement, les participants du groupe *action–perception* regardaient des essais issus de l'action du groupe *perception–action*. La procédure de changement de la valeur d'accélération et de la fin de l'expérience était la même que dans la tâche d'action.

Nous avons calculé pour chaque participant la valeur moyenne des changements de sens pour les deux escaliers psychophysiques réunis, ainsi que l'écart type de ce seuil de gravité moyen (Figure 28). Seuls les 10 derniers changements de sens de chaque escalier psychophysique ont été analysés, les deux premiers de chaque escalier étant considérés comme des fausses alarmes. Cette valeur moyenne de gravité indiquait autour de quelle valeur d'accélération les changements de sens se produisaient. Nous avons aussi transformé les réponses des participants en courbes de régression logistiques cumulées, et déterminé le Point d'Egalité Subjective (PES), c'est-à-dire la valeur d'accélération pour laquelle autant de réponses inférieures et supérieures étaient données. Nous avons aussi déterminé le seuil

différentiel (la Différence Juste Perceptible[18]), c'est-à-dire le changement d'accélération nécessaire pour passer de 50 % à 75 % de réponses « supérieures » à la gravité (Figure 29).

Nous avons ensuite analysé la gravité estimée et l'écart type obtenus par les escaliers psychophysiques, ainsi que le PES et le seuil différentiel correspondant à ces données, par une ANOVA, avec Tâche (*Action* vs. *Observation*) et Ordre (*Première session* vs. *Deuxième session*) en facteur inter sujet. Lorsque les interactions ont été significatives, nous avons cherché à identifier les différences significatives par l'utilisation de comparaisons planifiées en testant l'hypothèse a priori que dans la première session les participants estimeraient une gravité naturelle plus proche de la gravité terrestre et de manière plus précise dans la condition *action* plutôt que dans la condition *perception*.

[18] Ce seuil différentiel reflète la précision des réponses (Figure 29). Plus les participants ont une représentation précise de la gravité et plus la valeur de ce seuil est faible.

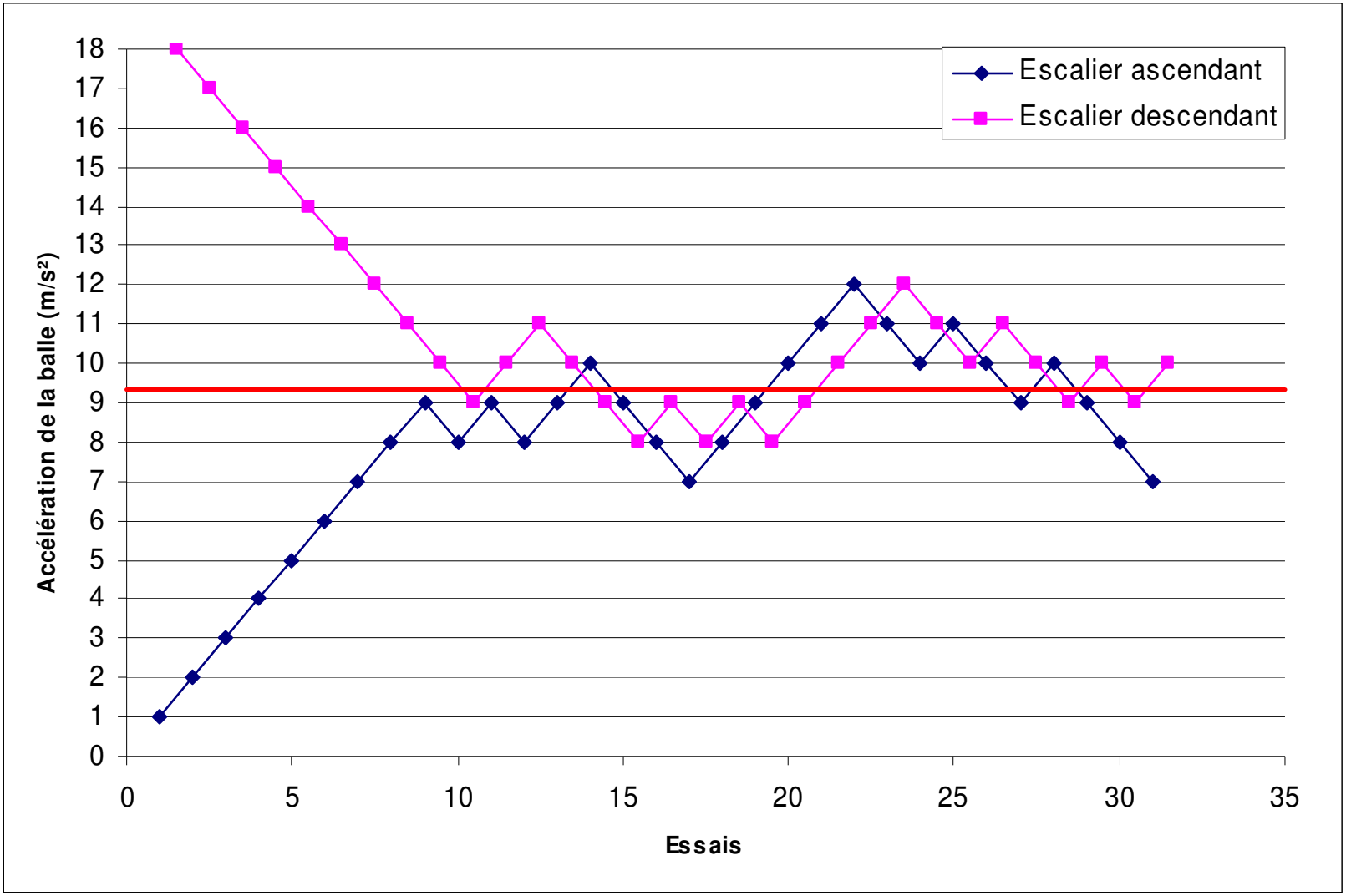


Figure 28 : Double escalier psychophysique pseudo-aléatoire d'un participant du groupe action-perception, dans la condition action, en bleu l'escalier ascendant et en rose l'escalier descendant. La courbe rouge représente la valeur moyenne des 10 derniers changements de sens des deux escaliers, et est considérée comme l'accélération estimée par le participant comme reflétant la gravité terrestre.

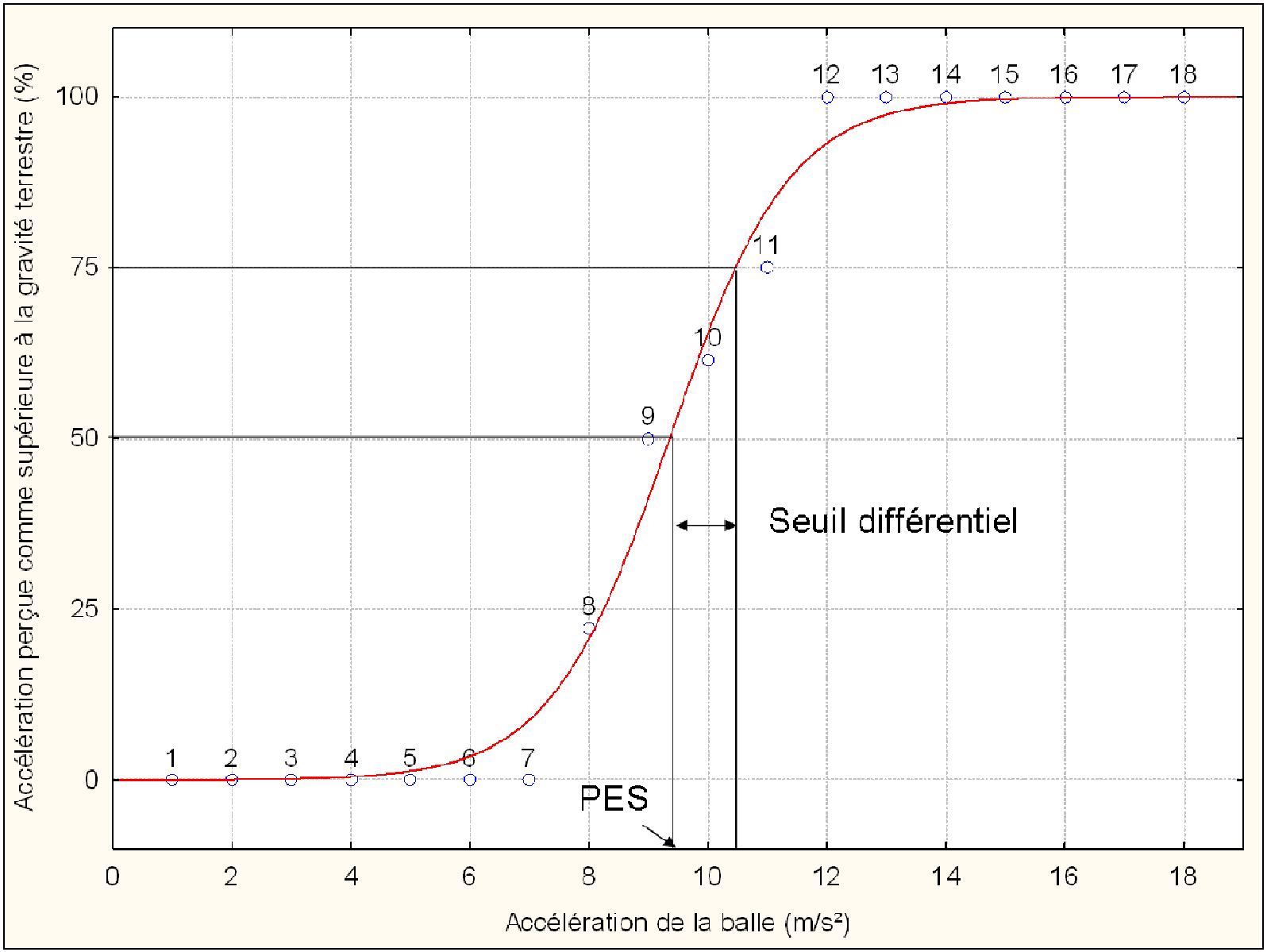


Figure 29 : Pourcentage de réponse « supérieure » données (point bleus) et courbe de régression logistique cumulée (en rouge), ajustée au données de la figure 28 avec l'équation $f(x) = \frac{1}{(1 + Exp(-(X - PSE)/JND))} \times 100$, *où X est l'accélération réelle de la balle. Dans cet exemple, le PES = 9.35 m/s² et le seuil différentiel = 1.01 m/s²*

2.2.3 Résultats

Les résultats montrent tout d'abord que la gravité estimée au moyen des escaliers psychophysiques ne dépend pas de la tâche accomplie, $F(1, 32) = 1{,}12$, $p > .05$, ni de l'ordre de passage des sessions, $F(1, 32) < 1$. L'ANOVA montre par contre un effet d'interaction Tâche × Ordre, $F(1, 32) = 5{,}76$, $p < .05$. La comparaison planifiée nous montre que dans la *Première session*, le seuil de gravité est significativement plus élevé dans l'*Action* (seuil de 8.42 m/s²) que dans l'*Observation* (seuil de 6.11 m/s²). Cependant, un t de student nous indique que le seuil de la condition *action* reste significativement différent de 9.81 m/s², $t(8) = -2.49$, $p < .05$. L'ANOVA sur l'écart type du seuil de gravité montre un effet de la tâche, $F(1, 32) = 6{,}24$, $p < .05$, avec un écart type plus faible dans la condition *Action* (1.11 m/s²) que dans la condition *Observation* (1.39 m/s²). Aucun effet n'est montré de l'ordre, $F(1, 32) < 1$, ni interaction, $F(1, 32) < 1$.

L'analyse du PES et du seuil différentiel montre le même pattern de résultats. Tout d'abord, seul un effet d'interaction Tâche × Ordre est mis en évidence par l'ANOVA sur le PES, $F(1, 32) = 5{,}94$, $p < .05$. La comparaison planifiée nous montre ici encore que la gravité subjective est significativement plus élevée dans l'*action* (8.28 m/s²) que dans l'*observation* (5.95 m/s²), et le t de student indique que la valeur trouvée dans l'*action* est significativement plus faible que 9.81 m/s², $t(8) = -2.76$, $p < .05$. Le seuil différentiel est significativement différent selon la tâche, $F(1, 32) = 4{,}82$, $p < .05$, les participants étant plus précis dans la condition *action* (seuil différentiel = 0.89 m/s²) que dans la condition *perception* (seuil différentiel = 1.40 m/s²).

2.2.4 Conclusion

Les résultats montrent que les participants jugent naturelle une trajectoire accélérée à une valeur inférieure à la gravité terrestre. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus par Twardy et Bingham (2002) montrant que la trajectoire d'une balle qui rebondit est jugée

comme naturelle lorsque l'accélération de la balle est inférieure à la gravité terrestre mais est jugée non naturelle si l'accélération de la balle est supérieure à la gravité terrestre.

Les résultats montrent aussi que l'action améliore la perception de l'accélération de la balle, celle-ci étant plus juste et plus précise dans la condition *action* que dans la condition *observation*. Ceci pourrait s'expliquer selon le modèle MOSAIC (Wolpert et al., 2003) ou le modèle d'émulation de Grush (2004) par l'utilisation de la copie d'efférence du geste moteur pour émuler, c'est-à-dire simuler, les conséquences visuelles du geste, et comparer cette prédiction au mouvement de la balle réellement produit. Ainsi, si la balle part visuellement plus haut que prédit, cela pourrait signifier que l'accélération appliquée à la balle est inférieure à la gravité terrestre, et inversement si la balle s'arrête plus bas que prédit, cela pourrait signifier que l'accélération appliquée à la balle est supérieure à la gravité terrestre. L'absence de copie d'efférence dans la condition *observation* rendrait cette prédiction moins fiable, et le jugement serait donc moins juste et moins précis. Dans le cadre des théories écologiques de Gibson (1979), les résultats pourraient s'expliquer par la détection qui serait meilleure dans l'action que dans l'observation d'un flux visuel (le mouvement de la balle) différent de celui attendu vu la force (le mouvement de frappe). Nos résultats ne permettent pas de conclure quant au modèle utilisé par les participants. Cependant, l'observation de meilleures performances dans l'action que dans l'observation est en contradiction avec l'utilisation d'un modèle interne de la gravité, et plaide en faveur de l'utilisation d'une autre information dans le jugement des participants.

Cependant, la tâche ne nous permet pas l'identification de cette information. Nous nous sommes servis dans notre tâche de l'accélération issue des escaliers psychophysiques ou des courbes de régression logistique comme le reflet de leur capacité à identifier correctement l'accélération gravitaire. Cependant, cela ne signifie pas que ce soit effectivement l'accélération de la balle qui soit perçue et jugée dans la réponse des participants. Ce serait

d'ailleurs étonnant au vu des résultats de Werkhoven et al. (1992) ou Watamaniuk et Heinen (2003) montrant que le système visuel perçoit très difficilement l'accélération visuelle d'un objet en mouvement. Toute autre variable covariant avec l'accélération de la balle pourrait être utilisée dans le jugement des participants, comme notamment le temps de déplacement de la balle, ou l'erreur spatiale commise par les participants. Or, ces deux paramètres de la trajectoire de la balle ne peuvent donner directement accès à l'accélération de la balle car ils dépendent de la vitesse à l'impact donnée par les participants lors de la frappe de la balle, ainsi que de l'accélération appliquée à la simulation. La connaissance de la vitesse à l'impact dans la condition *action* par les informations kinesthésiques du mouvement du bras ainsi que la vitesse visuelle de la raquette permet ainsi l'estimation univoque de l'accélération de la balle. Ce n'est pas le cas dans la condition *observation*, dans laquelle la vitesse à l'impact n'est donnée que par la vitesse visuelle de la raquette, et pour laquelle l'estimation de l'accélération est donc moins précise. L'utilisation d'une de ces variables pour juger l'accélération de la balle pourrait donc expliquer les différences observées entre les conditions *action* et *observation*. D'autres expérimentations sont nécessaires pour déterminer de manière univoque l'information utilisée dans le jugement des participants dans cette tâche.

2.3 Conclusion du chapitre 2

Les résultats du chapitre 2 nous montrent deux choses. Tout d'abord, dans leurs jugements perceptifs, les êtres humains injectent d'eux-mêmes tous les facteurs de la physique dans la stimulation visuelle qu'ils observent, tels que l'accélération gravitaire, mais aussi la friction (du sol ou de l'air). Les contraintes de la physique façonnent donc notre perception. Cependant, les résultats de l'expérimentation 1 démontrent que ces facteurs sont pris en compte qualitativement et non quantitativement. L'expérimentation 2 montre elle que l'action améliore la perception de l'accélération gravitaire, plaidant ainsi pour l'utilisation de

la copie d'efférence générée par l'action motrice pour juger l'accélération d'une balle en chute libre. Dans le chapitre 3, nous avons voulu déterminer si la gravité influençait nos actions d'interception d'une manière différente, via l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité.

Chapitre 3

Gravité et actions d'interception indirecte

Chapitre 3 : Gravité et actions d'interception indirecte

Après avoir cherché à déterminer l'influence de la gravité sur notre perception, nous nous sommes intéressés à l'effet que cette constante de la physique pouvait avoir sur nos actions. Nous avons ainsi voulu tester l'hypothèse de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité lors de l'interception d'une balle en chute libre.

3.1 Expérimentation 3

3.1.1 Problématique

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la fenêtre temporelle est un paramètre crucial des actions d'interception (e.g., Tresilian & Lonergan, 2002). Elle quantifie le temps disponible pour intercepter un objet, et donc la précision temporelle nécessaire. Or, la fenêtre temporelle n'a pas été contrôlée dans les expériences menées par Zago et al. (e.g., Zago et al., 2004). De ce fait, les résultats très différents obtenus dans les conditions de chute de balle en accélérant à 1g ou à vitesse constante (0g) peuvent être le reflet de la différence entre la fenêtre temporelle présentée par la balle virtuelle et la fenêtre temporelle utilisable par la balle réelle, et non provenir de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité permettant une meilleure estimation du TTC dans le cas de la balle accélérant.

Par conséquent, nous avons réalisé une expérience dans laquelle la fenêtre temporelle était contrôlée et maintenue identique dans toutes les conditions (1g ou 0g). Nous avons utilisé une tâche d'interception indirecte dans laquelle les participants devaient initier le mouvement d'un intercepteur pour que celui-ci entre en collision avec un objet à un point d'interception. Ce type d'interception possède deux particularités lui conférant un intérêt particulier. Premièrement, le mouvement de l'intercepteur peut être initié par une coordination motrice importante (cas de la passe en sport collectif) mais aussi par une simple pression sur un bouton (cas par exemple de la personne tirant à la carabine sur pigeon d'argile). Dans ce dernier cas, la composante motrice de la tâche devient minimale et l'erreur commise peut être

attribuée pour une large part aux limites des processus perceptifs. Deuxièmement, l'impossibilité de contrôler la trajectoire de l'effecteur durant son mouvement permet de déterminer l'information utilisée. En effet, comme l'information est utilisée sur un mode prédictif, elle induit des erreurs quand elle ne rend pas compte précisément du TTC. Ces erreurs sont donc prédictibles en fonction de l'information utilisée (Benguigui et al., 2003). Dans cette expérience, nous avions pour but de déterminer la source d'information utilisée. A ce sujet, Senot et al. (2003) proposent que trois stratégies puissent être utilisées pour intercepter un objet qui accélère. La première est définie comme une stratégie d'ordre 2, car elle repose sur des informations sur l'accélération du mobile, correspondant à la dérivée seconde de la position par rapport au temps. Elle peut par exemple reposer sur l'utilisation d'un modèle interne de la gravité et dans ce cas, on peut parler d'un accès à TTCg. Elle peut également reposer sur des informations sur l'accélération et on peut parler d'un accès à TTC2. L'utilisation de TTC2 devrait induire des réponses optimales dès le premier essai pour les trajectoires accélérées et les trajectoires à vitesse constante (dans cas, la valeur attribuée à l'accélération est nulle). L'utilisation de TTCg devrait induire des réponses optimales seulement pour les trajectoires avec une accélération gravitaire. Pour les déplacements à vitesse constante, les réponses devraient être trop précoces.

La seconde est définie comme une stratégie d'ordre 1, car elle repose sur des informations sur la vitesse du mobile, correspondant à la dérivée première de la position par rapport au temps. Elle peut par exemple reposer sur l'utilisation de la variable optique tau (Lee, 1976) ou encore à l'utilisation du ratio vitesse/distance. Cette stratégie est optimale pour les déplacements à vitesse constante. En revanche, pour les trajectoires accélérées, elle induit des erreurs positives (Benguigui et al., 2003). Néanmoins, si la même trajectoire est présentée plusieurs fois, il est envisageable de corriger les erreurs en initiant la réponse pour une valeur critique de TTC1 permettant d'être précis.

La troisième est définie comme une stratégie d'ordre zéro car elle repose sur des informations de position de la balle. La limite de cette stratégie est qu'elle ne fonctionne que si l'on connaît à l'avance la trajectoire à intercepter pour savoir à quelle position déclencher le mouvement de l'effecteur. Pour une trajectoire nouvelle, ou lorsque la vitesse et l'accélération de la balle d'un essai sur l'autre changent, elle mène à des erreurs. C'est donc une stratégie qui nécessite quelques essais pour être efficace.

3.1.2 Protocole expérimental

Dans cette expérience, 30 participants (22 hommes et 8 femmes, âge moyen 23 ans ±4) ont été testés. Pour un premier groupe de participants (N = 15), une balle virtuelle se déplaçait avec une accélération de 1g tandis que pour un second groupe (N = 15) la balle virtuelle se déplaçait avec une accélération de 0g. Durant le test, la balle virtuelle était initialement positionnée sur le point d'interception. Les participants pressaient la barre « espace » pour initier l'essai, et un temps aléatoire après, la balle virtuelle était projetée vers le haut pour ensuite retomber vers le point d'interception. Les participants devaient alors presser la touche « entrée » pour initier le mouvement d'un effecteur afin que celui-ci entre en collision avec la balle au point d'interception. Cette expérience a été réalisée dans un amphithéâtre et la projection a été faite sur un mur de cet amphithéâtre.

Dans la condition 1g, la balle virtuelle[19] était projetée vers le haut avec une vitesse initiale de 6.867 m/s (axe vertical orienté vers le haut) et une accélération de -9.81 m/s². Après 700 ms de montée correspondant à une hauteur de 2.40 m, la balle atteignait une vitesse nulle pour ensuite retomber avec une vitesse accélérée conduisant à atteindre le point d'interception 700 ms plus tard, avec une vitesse au point d'interception de -6.867 m/s. Dans la condition 0g,

[19] L'expérience 7 traitée dans le chapitre 4 compare l'utilisation d'une balle réelle ou virtuelle dans les actions d'interception. Celle-ci ne montrant pas de différence dans les performances selon le type de balle, les expériences d'interception indirecte du chapitre 3 ont été conduites avec une balle virtuelle à intercepter.

la balle était projetée vers le haut avec une vitesse initiale de -6.867 m/s et une accélération nulle. Après 700 ms de montée correspondant à une hauteur de 4.81 m, la vitesse de la balle virtuelle s'inversait donnant l'impression de « rebondir » sur le plafond de l'amphithéâtre, pour retourner vers le point d'interception avec une vitesse toujours constante de -6.867 m/s. Dans les deux conditions, l'effecteur était positionné sur la gauche du point d'interception, à 1.2 m et avait une trajectoire perpendiculaire à celle de la balle, se déplaçant à une vitesse de 4 m/s, couvrant la distance de 1.2 m en 300 ms. Les balles ainsi que l'effecteur avaient un diamètre de 10 cm. Ces différents paramètres permettaient d'obtenir dans les deux conditions d'accélération une fenêtre temporelle identique de ±14.5 ms [$(T_b + T_i) / V_b = 29$ ms, avec T_b la taille de la balle, T_i la taille de l'intercepteur et V_b la vitesse de la balle entrant dans la zone d'interception voir équation (5) page 45 pour plus de détails].

Avant le test, les participants étaient soumis à un entraînement, afin de s'approprier les caractéristiques de l'effecteur, et en particulier son temps de mouvement. Dans cet entraînement, les participants devaient réaliser la même tâche d'interception indirecte, mais avec une balle dont le point de départ était situé 1 m au dessus du point d'interception et 2 m sur sa droite, la balle se déplaçant donc de haut en bas et de droite à gauche. La balle se déplaçait sur l'axe des X avec une vitesse de -2.86 m/s et sur l'axe des Y avec une vitesse de -1.43 m/s, atteignant le point d'interception 700 ms après son départ comme dans le test. L'effecteur avait les mêmes propriétés (taille, point de départ, vitesse) que dans l'expérience. Les participants devaient réaliser 10 essais, puis autant d'essais que nécessaires pour commettre une erreur inférieure à ± 50 ms trois fois dans un bloc de 5 essais. Ce critère a été atteint en moyenne après 23 essais. Passé cet entraînement, les participants réalisaient 40 essais, puis, après une pause de 5 minutes, réalisaient un post test de 10 essais. Après chaque essai, les participants recevaient un feedback sur leur erreur constante (EC) en ms. L'EC

correspondait à la différence entre le moment d'arrivée de l'effecteur et le temps mis par la balle pour atteindre le point d'interception. Une erreur positive correspondait à l'arrivée en retard de l'effecteur par rapport à la cible à intercepter alors qu'une erreur négative correspondait à l'arrivée en avance de l'effecteur.

Avant les analyses, l'EC a été soumise à un filtrage des erreurs atypiques. Pour chaque groupe d'accélération et pour chaque essai, nous avons calculé l'erreur constante moyenne (M_{EC}) et l'écart type (SD). Nous avons alors remplacé toutes les valeurs d'EC qui n'étaient pas comprises entre M_{EC}-2SD et M_{EC} +2SD par M_{EC} du même essai du même groupe d'accélération (voir annexe C pour un exemple de la méthode de filtrage). Un total de 3.50% des essais ont été remplacés dans la condition d'accélération 1g et 2.67% dans la condition d'accélération 0g.

En plus de l'EC, nous avons analysé l'erreur absolue (EA) de chaque essai, qui correspond à la valeur absolue de l'EC pour chaque essai. L'EA renseigne sur la valeur moyenne des erreurs indépendamment du signe. Nous avons également analysé l'erreur initiale (EI) (sous forme d'EC et d'EA), qui correspond à l'erreur commise au premier essai. Ce premier essai est particulièrement intéressant car c'est le seul essai dans lequel la cinématique de la balle est encore inconnue et notre représentation de la trajectoire n'a pas encore été corrigée par la présentation d'un essai précédent (e.g., de Lussanet, Smeets, & Brenner, 2001, 2002). Nous nous sommes également intéressés au taux d'interception (TI) qui correspond au pourcentage d'essais pour lesquels l'erreur est comprise dans la fenêtre temporelle de ±14.5 ms définie par les conditions expérimentales. Ce taux d'interception a été calculé pour chaque bloc de 10 essais. Enfin, nous avons analysé l'écart type des participants (ΔEC) calculé pour chaque bloc de 10 essais.

EC et EA ont été analysées séparément dans une ANOVA au plan S⟨Accélération de la balle (2)⟩ ×Répétition (40) avec *Accélération de la balle* (1g vs. 0g) en facteur inter sujet et *Répétition* (Essai 1 vs. Essai 2 vs. … vs. Essai 40) en facteur intra sujet. Nous avons aussi réalisé un t de student pour comparer l'erreur initiale des groupes d'accélération de la balle (1g vs. 0g). Enfin, TI et ΔEC ont été analysés par une ANOVA au plan S⟨Accélération de la balle (2)⟩ ×Bloc de 10 essais (4) avec *Accélération de la balle* (1g vs. 0g) en facteur inter sujet et *Bloc de 10 essais* (Bloc 1 vs. … vs. Bloc 4) en facteur intra sujet. Les données du post test ont été analysées de la même façon mais avec un facteur *répétition* à 10 niveaux, et un t de student pour TI. Pour tous les tests statistiques, un seuil de significativité alpha de .05 a été utilisé et des tests post hoc de Newman-Keuls ont été réalisés pour identifier l'origine des différences significatives.

3.1.3 Résultats

L'ANOVA sur l'EC montre un effet marginal de la condition d'accélération de la balle, $F(1, 28) = 3.79$, $p = .06$, EC étant en moyenne de -4 ms dans la condition 1g et -13 ms dans la condition 0g. L'ANOVA montre aussi un effet de la répétition sur EC, $F(39, 1092) = 3.29$, $p < .05$, le test post hoc indiquant que l'essai 1 est différent de tous les autres essais, puis que l'EC n'est plus différente entre les essais dès le sixième essai. Enfin, les résultats ne montrent pas d'effet d'interaction Accélération de la balle × Répétition, $F(39, 1092) = 1.26$, $p > .05$ (Figure 30). L'ANOVA sur EA ne montre pas d'effet de la condition d'accélération, $F(1, 28) = 2.46$, $p > .05$, (EA = 52 ms dans la condition 1g et 58 ms dans la condition 0g). Ceci montre que l'EC moyenne plus proche de 0 dans la condition d'accélération 1g est due à une compensation des erreurs négatives et positives et non pas à un effet de la condition de l'accélération 1g en soi. L'ANOVA révèle par contre un effet de la répétition sur EA, $F(39, 1092) = 2.11$, $p < .05$, le test post hoc montrant que seul l'essai 1

diffère de certains des autres essais. Enfin, l'ANOVA révèle un effet d'interaction Accélération de la balle × Répétition, $F(39, 1092)=1.51$, $p < .05$, mais le test post hoc ne montre aucune différence dans les erreurs pour des essais de même rang (i.e., pas de différence entre les essais 1 dans la condition 1g vs. 0g, pas de différence entre les essais 2, etc.).

Le t de student sur l'erreur initiale ne montre aucun effet de la condition d'accélération, exprimée en EC, $t(28) = -0.69$, $p > .05$, ou en EA, $t(28) = -0.13$, $p > .05$. L'ANOVA sur TI ne montre aucune différence selon la condition d'accélération, $F(1, 28) = 2.63$, $p > .05$, ou du bloc d'essai, $F(3, 84) = 1.15$, $p > .05$, avec respectivement un TI moyen de 20% et 16% pour la condition 1g et 0g. Enfin, l'ANOVA sur ΔEC ne montre pas elle non plus d'effet de la condition d'accélération, $F(1, 28) = 1.17$, $p = >.05$, mais un effet du bloc d'essai, $F(3, 84) = 7.52$, $p < .05$. Le test post hoc montre que ΔEC du premier bloc d'essai est différent de tous les autres blocs d'essais (avec en moyenne un ΔEC de 77 ms dans le premier bloc contre 61 ms dans les trois autres blocs d'essais).

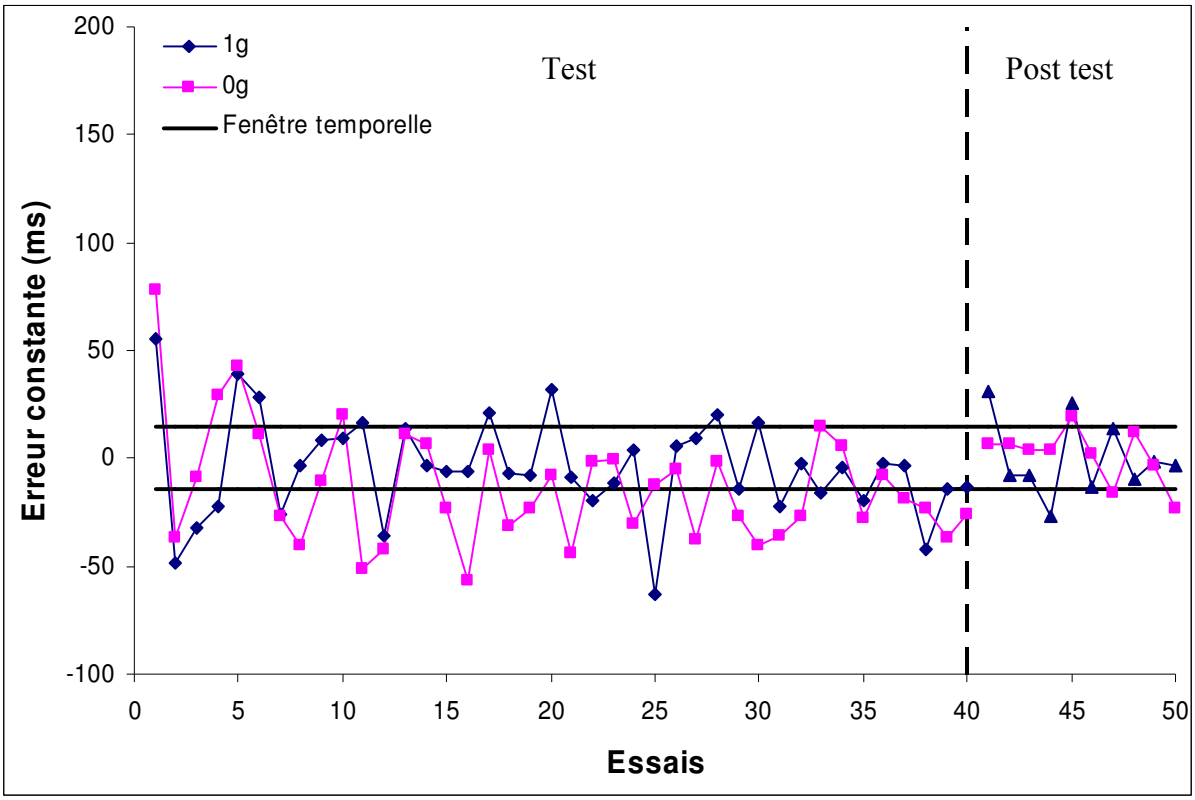


Figure 30 : Evolution de l'EC durant le test et le post test en fonction de la condition d'accélération de la balle. Les traits noirs représentent la fenêtre temporelle de ± 14.5 ms définie par les contraintes expérimentales.

Les résultats de l'ANOVA sur l'EC au post test ne montrent aucun effet principal de la condition d'accélération de la balle, $F(1, 28) < 1$, de répétition $F(9, 252) < 1$, ni d'effet d'interaction Accélération de la balle × Répétition $F(9, 252) < 1$. Les résultats ne montrent pas non plus d'effet sur l'EA, ni de la condition d'accélération de la balle, $F(1, 28) < 1$, et de la répétition $F(9, 252) = 1.63$, $p > .05$. Cependant, on observe un effet d'interaction Accélération de la balle × Répétition sur l'EA, $F(9, 252) = 2.67$, $p < .05$. Toutefois, le test post hoc ne signale aucune différence dans les erreurs pour des essais de même rang (i.e., pas de différence entre les essais 1 dans la condition d'accélération 1g vs. 0g, pas de différence entre les essais 2…). Enfin, un t de sudent ne montre pas de différence sur TI selon la condition d'accélération, $t(28) = -1.06$, $p > .05$, respectivement 17% et 20% pour la condition 1g et 0g.

3.1.4 Conclusions

Les résultats de l'expérience 3 ne montrent pas de différence dans l'interception indirecte d'une balle tombant à 1g ou 0g, lorsque la fenêtre temporelle est identique. Cela contredit l'hypothèse de l'utilisation de TTC1 (e.g., Benguigui et al., 2003) pour intercepter indirectement une balle en mouvement. Dans ce cas, nous aurions dû observer des erreurs importantes lorsque la balle chute à 1g du fait de la non prise en compte de l'accélération de la balle par TTC1, et des erreurs faibles lorsque la balle chute à 0g car sa vitesse est constante.

Ces résultats contredisent aussi l'utilisation de TTCg et du modèle interne de la gravité (e.g., Zago et al., 2004), qui aurait dû montrer le pattern d'erreurs inverse : des erreurs importantes dans le cas d'une balle chutant à 0g du fait d'une anticipation erronée d'une accélération de la balle, et des erreurs faibles lorsque la balle chute à 1g comme prédit par une utilisation de TTCg. Ces résultats remettent ainsi en cause ceux obtenus par Zago et al. (2004) dans lesquels la fenêtre temporelle n'était pas contrôlée où de meilleurs résultats lorsque la balle accélère à 1g étaient interprétés comme une preuve de l'internalisation des effets de la gravité. Bien que Zago et al. (2004) aient utilisé une tâche d'interception directe dans laquelle la composante motrice est beaucoup plus importante que dans la tâche réalisée ici, leurs conclusions portent bien sur une différence de perception du TTC entre une condition dans laquelle la balle chute à 0g ou à 1g, et non sur une différence dans la réponse motrice.

L'utilisation d'une stratégie d'ordre zéro est la seule compatible avec les résultats dans la condition 1g et 0g, ce qui signifierait que les participants initient le mouvement de l'effecteur lorsque la balle atteint une position spécifique. Cependant, pour utiliser une telle information, quelques essais sont nécessaires pour déterminer avec précision la position spécifique de la balle pour laquelle la réponse doit être initiée, pendant lesquels la balle n'est pas interceptée. Ceci pourrait expliquer au moins en partie le faible taux d'interception des

participants, respectivement 20% et 16% pour la condition 1g et 0g dans le test. Ce taux peut s'expliquer de plus par trois raisons supplémentaires. Tout d'abord, la fenêtre temporelle est très réduite, ± 14.5 ms, du fait de la petite taille de l'effecteur et de la balle, ainsi que la vitesse élevée de la balle lorsqu'elle atteint le point d'interception (6.867 m/s). De plus, les actions d'interception indirectes sont des tâches prédictives, ne permettant pas de corriger le geste en cours d'exécution. Il n'est donc pas étonnant de constater un si faible taux d'interception au vu de ces deux contraintes.

Néanmoins, deux limites méthodologiques pourraient invalider les résultats expérimentaux obtenus. La première concerne la cinématique de l'effecteur, qui pourrait avoir une influence sur la performance des participants. La deuxième concerne l'entraînement réalisé avant le test, qui pourrait avoir été insuffisant et expliquer l'erreur des participants. Nous avons donc conduit deux expériences afin de contrôler l'effet de ces deux biais potentiels. Ces deux expériences contredisent les limites envisagées, validant ainsi les conclusions tirées de l'expérience 3 (voir la partie expérimentations contrôles pour plus de détails).

Les résultats de cette expérience n'ont pas permis de trancher entre l'utilisation de TTC2, TTCg et TTC1 et suggèrent plutôt l'utilisation d'une stratégie d'ordre 0. Cependant, il faut souligner que nos hypothèses et prédictions reposaient essentiellement sur l'erreur commise au premier essai. Il n'est pas impossible que les résultats soient dus précisément à la prise en compte d'un seul essai par participants.

Par conséquent, nous avons réalisé deux expériences reposant pour la première sur une procédure incluant des essais pièges dans lesquels les caractéristiques cinématiques de la trajectoire sont manipulées et pour la seconde sur une procédure visant à aider les participants dans l'utilisation d'une stratégie d'ordre 0.

Chapitre 3 : Gravité et actions d'interception indirecte

3.2 Expérimentation 4

Nous avons cherché à déterminer dans cette quatrième expérience[20] l'information utilisée pour initier le mouvement d'interception d'une balle en chute libre. Pour cela, nous avons réalisé une expérience comprenant des essais pièges, consistant en une modification inattendue de l'accélération de la balle en chute. Ainsi, plusieurs essais vont pouvoir nous renseigner sur l'information utilisée au moyen de prédiction d'erreurs, et non plus uniquement le premier essai.

3.2.1 Protocole expérimental

Dans cette expérience, 11 participants (1 femme et 10 hommes, âge moyen 24 ans ±6) ont été testés dans une tâche d'interception indirecte. La tâche consistait à déclencher le mouvement d'un intercepteur pour que celui-ci entre en collision avec une balle chutant à 1g à un point d'interception prédéfini.

Un vidéo-projecteur connecté à un ordinateur portable permettait de simuler sur un mur de six mètres de haut le déplacement d'une balle propulsée vers le haut et retombant sous l'effet de la gravité. Les participants étaient assis à dix mètres du mur, et répondaient sur les touches d'un clavier d'ordinateur.

Pendant l'expérience, la balle à intercepter était initialement placée 2.97 m au dessus du point d'interception, et partait vers le haut avec une vitesse initiale de 6.15 m/s avec une accélération gravitaire de -9.81 m/s². Après 625 ms de montée correspondant à une hauteur maximale de 4.905 m au dessus du point d'interception, la balle atteignait une vitesse nulle puis retombait vers le point d'interception et l'atteignait à nouveau 1 s après, avec une vitesse au point d'interception de -4.905 m/s. L'effecteur était situé à 1.2 m du point d'interception et

[20] Cette expérience est en fait une condition expérimentale d'une expérience plus large menée dans le cadre de l'année de DEA. Cette condition expérimentale s'inscrivant parfaitement dans ce travail de thèse, nous avons effectué des traitements complémentaires sur cette expérience que nous rapportons ici.

se déplaçait à la vitesse constante de 3 m/s pour atteindre le point d'interception en 400 ms. L'effecteur ainsi que la balle avaient un diamètre de 12 cm. Après chaque essai, les participants recevaient un commentaire sur leur performance (« vous êtes très en retard » pour un retard de plus de 100 ms ; « vous êtes en retard » pour une erreur comprise entre 50 et 100 ms ; « vous êtes légèrement en retard » pour une erreur comprise entre 25 et 50 ms ; « Touché ! » pour une erreur comprise entre -25 et 25 ms ; « vous êtes légèrement en avance » pour une erreur comprise entre -25 et -50 ms ; « vous êtes en avance » pour une erreur comprise entre -50 et -100 ms ; « vous êtes très en avance » pour une erreur au delà de -100 ms).

Dans un premier temps, les participants réalisaient 120 essais identiques avec les paramètres cinématiques décrits ci-dessus. Après ces 120 premiers essais et une courte pause, les participants réalisaient à nouveau 120 essais. Ceux-ci incluaient 100 essais à nouveau selon les paramètres cinématiques décrits ci-dessus, et 20 essais pièges consistant en une modification de l'accélération et de la vitesse initiales alors que le point de départ était identique. L'accélération initiale était modifiée de ±50 % de l'accélération initiale par pas de ± 5%. Les 20 essais pièges étaient aléatoirement répartis dans les 100 essais standards.

Avant le test, les participants étaient soumis à un entraînement, afin d'intégrer parfaitement les propriétés de l'effecteur. Au cours de cet entraînement, les participants devaient réaliser la même tâche d'interception indirecte, mais avec une balle dont le point de départ était situé au même niveau vertical du point d'interception et 70 cm sur sa droite. La balle se déplaçait avec une vitesse de 0.7 m/s, atteignant le point d'interception 1 s après son départ. L'effecteur gardait lui exactement les mêmes propriétés (taille, point de départ, vitesse…).

Le premier bloc de 120 essais avait pour but de familiariser les participants avec les propriétés de l'effecteur et la cinématique de la balle à intercepter. Les essais pièges ont été inclus dans le second bloc d'essais pour déterminer quelle information servait aux participants pour initier le mouvement de l'effecteur. En effet comme énoncé plus haut, l'impossibilité de réguler le mouvement de l'effecteur après son départ doit engendrer des erreurs spécifiques et identifiables si l'information utilisable ne rend pas compte du TTC exact. Si les participants par exemple apprennent à utiliser TTC1 durant le premier bloc d'essais, l'initiation du mouvement de l'effecteur pour une même valeur de TTC1 alors que la cinématique a changé va mener à une erreur spécifique pouvant être déterminée. Ainsi les erreurs commises aux essais pièges devraient nous permettre d'identifier quelle(s) source(s) d'information(s) est (sont) prise(s) en compte pour initier le mouvement de l'effecteur. Nous avons calculé les erreurs qui devaient être commises sur la base de quatre informations possibles : TTC1 ; TTCg ; une distance seuil ou une vitesse seuil (Annexe D).

3.2.2 Résultats

Nous avons comparé les erreurs commises avec les erreurs prédites par une analyse de régression (Figure 31). Les erreurs prédites étant fortement corrélées les unes aux autres (Tableau 4), il n'est pas étonnant de constater que les R^2 obtenus dans les analyses de régressions soient très proches pour les différentes sources d'information. Pour déterminer l'information utilisée, nous avons donc comparé la pente de ces analyses de régression considérant que la source d'information utilisée devait être révélée par une pente proche de 1 correspondant à des erreurs commises du même ordre de grandeur que les erreurs prédites.

Nous avons réalisé une MANOVA avec Information (Vitesse vs. Position vs. TTCg vs. TTC1) en facteur intra sujet. Celle-ci montre que la valeur de la pente de régression est différente selon l'information utilisée, Wilks' $\Lambda = 0.08$, $F(4, 7) = 20.94$, $p < .05$. Un test t de student a aussi permis de montrer que les pentes moyennes obtenues pour l'information de

vitesse et de position sont significativement différentes de 1, respectivement $t(10) = 3.71$, $p < .05$ et $t(10) = -6.51$, $p < .05$. La pente pour l'information vitesse est ainsi de 2.08 pour l'information vitesse, ce qui signifie que l'erreur commise est plus de deux fois supérieure à l'erreur prédite. De manière analogue, la pente pour l'information position est de 0.51, signifiant que l'erreur commise est tout juste supérieure à la moitié de l'erreur prédite. Ainsi, les pentes des informations de distance et de vitesse semblent exclurent l'utilisation de ces deux informations. En revanche, les pentes obtenues pour TTCg (0.89) et TTC1 (1.09) ne sont pas différentes de 1, respectivement $t(10) = -0.80$, $p > .05$ et $t(10) = 0.54$, $p > .05$. Ces résultats ne permettent donc pas de trancher quant à l'utilisation de TTC1 ou TTCg pour l'ensemble des participants.

Une première interprétation consisterait à considérer que les prédictions d'erreurs pour TTC1 et TTCg ne sont pas suffisamment différentes pour répondre à la question posée. Une seconde interprétation serait de considérer que tous les participants ne répondent pas sur la base de la même information. En effet, il est possible que les participants n'aient pas tous utilisé la même information, et que les régressions conduites sur l'erreur moyenne masquent une différence interindividuelle. Un examen des résultats participant par participant permet d'étayer cette interprétation (Tableau 5). Si on prend comme critère la valeur de la pente et la proximité avec une valeur de 1, les résultats montrent que quatre participants utilisent TTCg, trois participants utilisent TTC1 et deux participants utilisent la position de la balle. Enfin, pour deux participants dont la pente pourrait sembler indiquer l'utilisation de la vitesse de la balle (PF et GS), la corrélation entre les erreurs prédites et commises est très faible et non significative. La faiblesse de ce r^2 pourrait indiquer que les participants ont utilisé plusieurs informations durant leur deuxième bloc d'essais, changeant d'information avec la pratique plutôt que de n'utiliser qu'une seule information comme les autres participants.

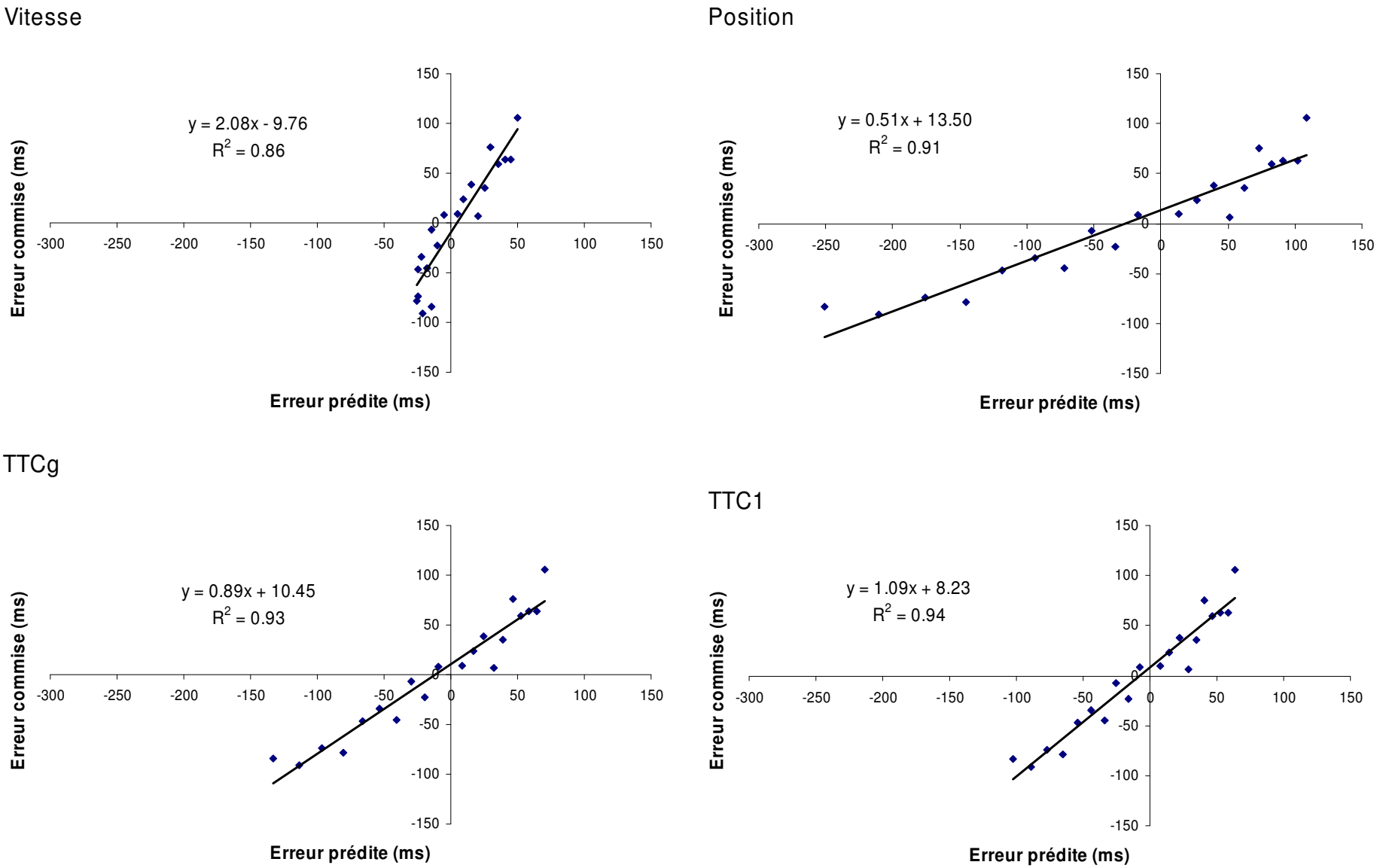


Figure 31 : Analyse de régression entre l'erreur moyenne commise par tous les participants aux essais pièges et l'erreur prédite sur la base de la vitesse de la balle, de la distance de la balle, de TTCg et de TTC1 (de gauche à droite et de haut en bas).

Tableau 4 : corrélation entre les différentes erreurs prédites. Ces corrélations étant très élevées, la discrimination de l'information utilisée a été réalisée sur la pente des régressions.

	Vitesse	Position	TTCg	TTC1
Vitesse	-	0.790	0.828	0.860
Position	0.790	-	0.998	0.992
TTCg	0.828	0.998	-	
TTC1	0.860	0.992	0.998	-

*Tableau 5 : Pente, ordonnée à l'origine et R² pour les régressions individuelles entre l'erreur commise et l'erreur prédite sur la base de la vitesse, de la position, de TTCg et TTC1. En rouge est indiquée l'information ayant la pente la plus proche de 1, et * indique les régressions significatives.*

Participant	Régression	Vitesse	Position	TTCg	TTC1
CC	**Pente**	**2.51**	**0.61**	**1.08**	**1.31**
	Intercept	*-25.28*	*2.81*	*-0.91*	*-3.60*
	R²	0.63*	0.67*	0.68*	0.69*
GB	**Pente**	**3.61**	**0.87**	**1.52**	**1.85**
	Intercept	*-14.42*	*22.47*	*17.32*	*13.55*
	R²	0.82*	0.92*	0.86*	0.87*
OR	**Pente**	**2.46**	**0.52**	**0.92**	**1.14**
	Intercept	*-9.79*	*15.46*	*12.55*	*10.39*
	R²	0.70*	0.55*	0.58*	0.60*
BF	**Pente**	**2.81**	**0.65**	**1.15**	**1.40**
	Intercept	*-18.82*	*11.68*	*7.83*	*5.00*
	R²	0.57*	0.54*	0.56*	0.57*
BB	**Pente**	**1.51**	**0.31**	**0.55**	**0.68**
	Intercept	*23.64*	*38.85*	*37.16*	*35.88*
	R²	0.47*	0.35*	0.37*	0.38*
YLB	**Pente**	**3.01**	**0.88**	**1.53**	**1.82**
	Intercept	*-15.70*	*21.81*	*16.19*	*12.18*
	R²	0.53*	0.82*	0.80*	0.78*
KLB	**Pente**	**2.38**	**0.63**	**1.09**	**1.32**
	Intercept	*-16.11*	*11.68*	*7.83*	*5.04*
	R²	0.55*	0.68*	0.68*	0.68*
PM	**Pente**	**1.79**	**0.40**	**0.71**	**0.87**
	Intercept	*4.25*	*23.20*	*20.92*	*19.22*
	R²	0.24*	0.21*	0.22*	0.23*
PF	**Pente**	**0.65**	**0.15**	**0.27**	**0.33**
	Intercept	*-13.85*	*-6.80*	*-7.68*	*-8.33*
	R²	0.03	0.03	0.03	0.04
DP	**Pente**	**1.75**	**0.43**	**0.75**	**0.91**
	Intercept	*-3.62*	*15.91*	*13.35*	*11.49*
	R²	0.38*	0.41*	0.41*	0.42*
GS	**Pente**	**0.45**	**0.15**	**0.26**	**0.31**
	Intercept	*-14.70*	*-8.54*	*-9.56*	*-10.26*
	R²	0.05	0.10	0.10	0.09
Moyenne	**Pente**	**2.08**	**0.51**	**0.89**	**1.09**
	Intercept	*-9.76*	*13.50*	*10.45*	*8.23*
	R²	0.86	0.91	0.93	9.34

3.2.3 Conclusion

Le but de cette expérience était d'identifier l'information utilisée dans une tâche d'interception indirecte d'une balle en chute libre. Les résultats obtenus sont contrastés. Les résultats traités sur un mode global permettent d'exclure l'utilisation des informations de position ou de vitesse, ainsi que TTC2, sans toutefois permettre de trancher entre l'utilisation de TTC1 ou TTCg. L'analyse des résultats participant par participant met à jour des différences interindividuelles, en montrant notamment que certains participants utiliseraient plutôt TTCg alors que d'autres utiliseraient TTC1. Il apparaît de plus que deux participants ont des résultats compatibles avec l'utilisation d'une information de distance.

Ces différences interindividuelles illustrent les hypothèses Tresilian (1995) ou de Caljouw et al. (2004c) à propos de l'existence de nombreuses sources d'information utilisées selon les différentes contraintes. La tâche à accomplir étant la même, la différence dans l'information utilisée proviendrait des contraintes organiques, c'est-à-dire les contraintes propres à l'acteur, comme son niveau d'expertise, l'utilisation d'une stratégie perceptive particulière ou son âge, qui amèneraient les participants à privilégier consciemment ou non certaines sources d'information par rapport à d'autres. Le troisième niveau de contrainte selon Caljouw et al. (2004c) concerne les contraintes environnementales de la tâche. Dans l'expérience suivante, nous avons voulu déterminer si l'utilisation d'une source d'information particulière pouvait être favorisée en modifiant ces contraintes environnementales.

Chapitre 3 : Gravité et actions d'interception indirecte

3.3 Expérimentation 5

3.3.1 Problématique

Parmi les nombreuses études qui cherchent à identifier les informations utilisées pour intercepter un objet en mouvement, peu se sont intéressées aux informations de position, ne donnant ni accès au TTC (e.g., $\tau(\theta)$, Lee, 1976) ni ne variant dans le temps (e.g., θ', la vitesse d'expansion de la balle). Par exemple, un observateur pourrait initier sa réponse lorsque la balle qu'il cherche à attraper atteint une position de référence. Ce type d'information très facilement perceptible et matérialisant concrètement le moment d'initiation idéal de l'effecteur pourrait améliorer les résultats dans des tâches d'interception indirecte ne permettant aucune régulation du mouvement.

Nous avons cherché à déterminer si des indices de position permettant ou facilitant l'utilisation d'une source d'information d'ordre zéro sont utilisés pour intercepter un objet en chute libre accéléré par la gravité. Dans cette expérience, nous nous sommes servis d'une tâche d'interception indirecte d'une balle chutant à 1g *avec indices* ou *sans indice* de position affichés dans le décor de la simulation.

3.3.2 Protocole expérimental

Dans l'expérience 4, deux groupes de 15 participants ont été comparés. Le premier groupe était formé par les participants du groupe 1g de l'expérience 3. Les résultats de ce groupe dans les conditions de l'expérience 3 servaient de référence. Le second groupe de participants était également composé de 15 participants qui réalisaient la même tâche d'interception indirecte que dans l'expérience 3 (condition 1g[21]) mais avec un fond texturé par des lignes horizontales espacées de 65 cm (Figure 32).

[21] La trajectoire de la balle, la fenêtre temporelle et le nombre d'essais ainsi que le déroulement (entraînement, test, post test) étaient identiques aux conditions 1g de l'expérience 3.

Chapitre 3 : Gravité et actions d'interception indirecte

La présence d'indices spatiaux avait pour but d'inciter l'utilisation d'une stratégie d'ordre zéro. En effet, cette stratégie repose sur le déclenchement de la réponse pour une valeur critique de position. La présence de ces indices devait aider les participants à repérer cette valeur critique. Cette utilisation devait donc se traduire par une plus grande précision et une moins grande variabilité dans les réponses.

Les EC ont été soumises au même filtrage que dans l'expérience 3. Un total de 4.33% des essais ont été remplacés dans la condition d'accélération 1g plus grille et 3.5% dans la condition d'accélération 1g.

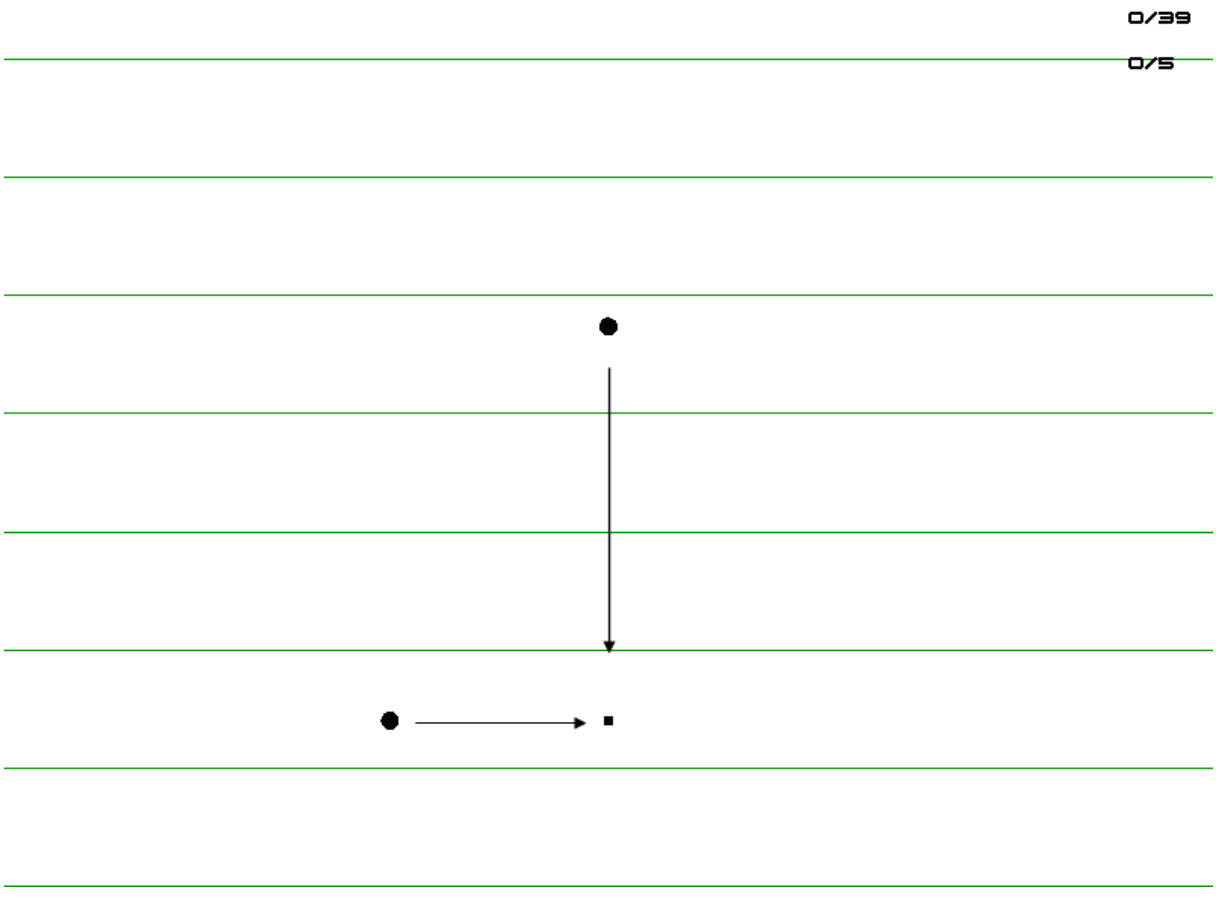


Figure 32 : représentation de la condition 1g + indices. La balle en haut est la balle à intercepter, tandis que la balle à gauche représente l'effecteur, le carré noir représentant le point d'interception. Les lignes horizontales représentent les indices spatiaux (absents dans la condition 1g) et sont espacées de 65 cm, les flèches noires représentent le sens du mouvement de la balle et de l'effecteur.

Les mêmes variables dépendantes que pour l'expérience 3 ont été analysées (EC, EA, TI et ΔEC pour chaque bloc de 10 essais), avec le plan d'analyse :

S⟨Indices spatiaux (2)⟩ × Répétition (40 pour le test ou 10 pour le post test).

3.3.3 Résultats

L'ANOVA montre un effet marginal de la condition d'Indices spatiaux sur l'EC, $F(1, 28) = 3.61$, $p = .07$, avec une EC de 5 ms dans la condition *avec indices* et -4 ms dans la condition *sans indice*. L'ANOVA montre aussi un effet de la répétition sur l'EC, $F(39, 1092) = 3.31$, $p < .05$, et le test post hoc montre que l'essai 1 est différent de tous les autres essais, puis que passé le sixième essai, aucune différence significative ne ressort entre les autres essais. Enfin, l'ANOVA révèle un effet d'interaction Indices spatiaux × Répétition, $F(39, 1092) = 1.64$, $p < .05$, cependant le test post hoc ne montre aucune différence dans les erreurs pour des essais de même rang (i.e., pas de différence pour l'essai 1 entre la condition *avec indices* vs. *sans indice*, pas de différence entre les essais 2…) (Figure 33). L'ANOVA sur l'EA confirme l'effet marginal de la condition Indices spatiaux, $F(1, 28) = 3.41$, $p > .05$, ($p = .08$), trouvé sur l'EC ; en suggérant que l'effet sur l'EC ne provient pas d'une compensation d'erreurs négatives et positives mais reflète une tendance de la condition d'Indices spatiaux sur l'erreur commise, avec une EA de 45 ms dans la condition *avec indices* et 52 ms dans la condition *sans indice*. L'ANOVA indique aussi un effet principal de la répétition sur l'EA, $F(39, 1092) = 4.93$, $p < .05$; le test post hoc confirme que l'essai 1 est différent de tous les autres essais, tandis qu'aucune différence significative ne ressort passé le septième essai. Enfin, l'ANOVA révèle un effet d'interaction Indices spatiaux × Répétition, $F(39, 1092) = 2.41$, $p < .05$, mais cette fois encore le test post hoc ne montre aucune différence dans les erreurs pour des essais de même rang.

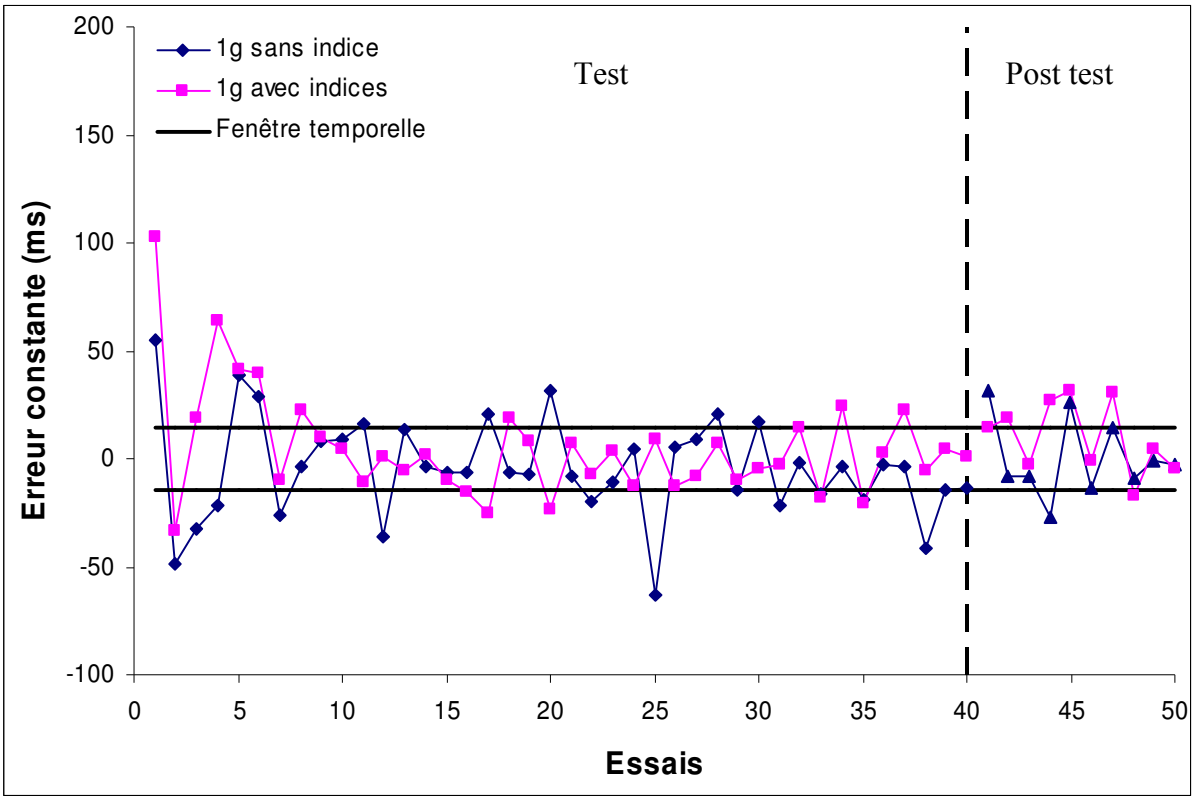


Figure 33 : Evolution d'EC durant le test en fonction de la condition d'Indices spatiaux. Les traits noirs représentent la fenêtre temporelle d'interception de ± 14.5 ms définie par les contraintes expérimentales.

L'ANOVA sur TI montre un effet des indices spatiaux, $F(1, 28) = 6.26$, $p < .05$, avec un TI moyen de 28% dans la condition *avec indices* contre 20% dans la condition *sans indice*. L'analyse montre également un effet du bloc d'essais, $F(3, 84) = 6.93$, $p < .05$. Le test post hoc montre que le TI du premier bloc est significativement différent du TI du deuxième bloc et du troisième bloc, mais pas du quatrième. De plus, l'ANOVA met à jour un effet d'interaction Indices spatiaux × bloc d'essais, $F(3, 84) = 4.35$, $p < .05$. Le test post hoc montre que seul le TI dans la condition *avec indices* s'améliore (augmentation significative du TI entre le premier bloc et le deuxième et entre le deuxième bloc et le troisième), alors que dans la condition *sans indice* le TI n'évolue pas significativement (Figure 34).

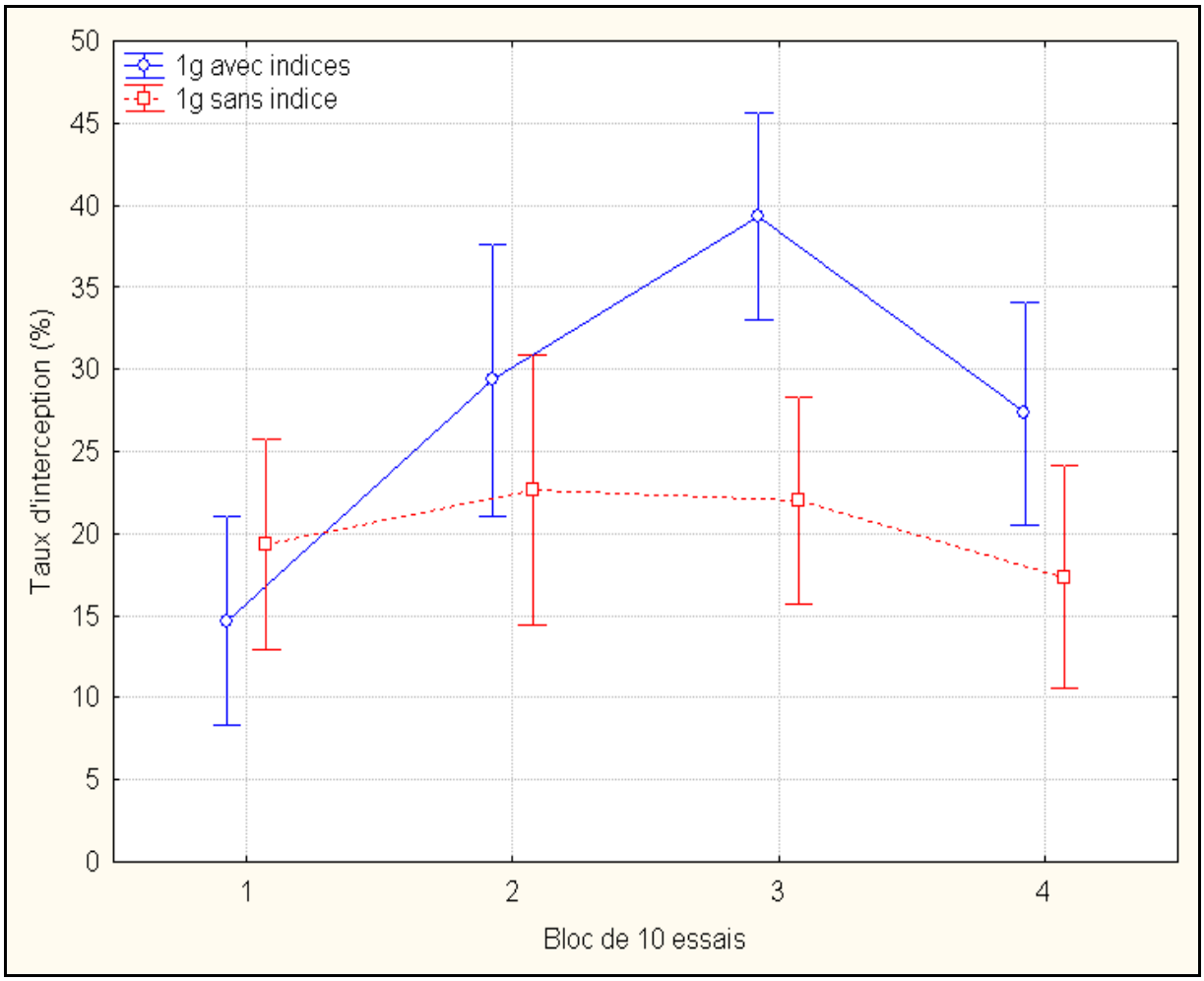


Figure 34 : Evolution de TI par bloc de 10 essais durant le test en fonction de la condition d'Indices spatiaux.

Enfin, l'ANOVA sur ΔEC montre un effet de la condition d'accélération, $F(1, 28) = 4.74$, $p < .05$, avec un ΔEC de 53 ms et 63 ms pour les conditions *avec indices* et *sans indice* respectivement. L'analyse montre aussi un effet du bloc d'essai, $F(3, 84) = 18.27$, $p < .05$. Le test post hoc montre que ΔEC du premier bloc d'essai est différent de tous les autres blocs d'essais (avec en moyenne un ΔEC de 76 ms dans le premier bloc contre 52 ms dans les trois autres blocs d'essais). Enfin, l'ANOVA révèle un effet d'interaction Indices spatiaux × bloc d'essais, $F(3, 84) = 8.03$, $p < .05$, montrant dans le test post hoc que ΔEC diminue significativement dans la condition *avec indices* (ΔEC est significativement supérieur

dans le premier bloc d'essai comparé à ΔEC des trois autres blocs), alors que ΔEC ne diminue pas significativement dans la condition *sans indice*.

Les résultats de l'ANOVA sur l'EC au post test ne montrent aucun effet de la condition d'Indices spatiaux, $F(1, 28) = 1.95$, $p > .05$, mais un effet de la répétition $F(9, 252) = 2.25$, $p < .05$. Cependant, le test post hoc ne montre aucune différence significative entre les essais. Enfin, l'ANOVA ne montre pas d'effet d'interaction Indices spatiaux × Répétition, $F(9, 252) = 1.07$, $p > .05$. Par contre, l'ANOVA montre une différence significative d'EA en fonction de la condition d'Indices spatiaux, $F(1, 28) = 15.57$, $p < .05$, avec une EA moyenne de 34 ms dans la condition *avec indices* et 53 ms dans la condition *sans indice*. Ce résultat montre qu'en moyenne, la performance est meilleure en présence d'indices spatiaux, et que l'absence d'effet significatif des indices spatiaux sur l'EC provient d'une compensation des erreurs négatives et positives masquant cet effet. Les résultats montrent aussi un effet de la répétition, $F(9, 252) = 2.05$, $p < .05$, mais là encore le test post hoc ne montre aucune différence significative entre les essais. Enfin, l'ANOVA sur l'EA ne montre pas d'effet d'interaction Indices spatiaux × Répétition $F(9, 252) = 1.27$, $p > .05$. Pour finir, le t de student confirme un effet des indices spatiaux sur le TI, $t(28) = 2.66$, $p < .05$, avec un meilleur taux de réussite (33%) avec les indices spatiaux plutôt que sans indices (17%). Enfin, le t de student fait sur ΔEC montre une variabilité plus faible pour le groupe *avec indices* (40 ms) que pour le groupe *sans indice* (61 ms), $t(28) = -3.66$, $p < .05$.

3.3.4 Conclusions

Les résultats de cette expérience montrent donc que des indices spatiaux peuvent améliorer l'interception d'un objet en chute libre. L'amélioration de TI et ΔEC d'un bloc d'essais sur l'autre dans la condition *avec d'indices* pourrait refléter la détection de la position

spécifique de la balle pour initier la réponse durant les premiers essais menant à des réponses erronées et variables, suivi une amélioration des résultats lorsque la position correcte d'initiation de la réponse a été détectée. Ces indices d'ordre zéro pourraient être utilisés en combinaison avec d'autres informations d'ordre 1 ou 2, ou bien en substitution après un apprentissage permettant d'identifier la position de référence de l'objet pour laquelle la réponse optimale doit être initiée.

Pourtant, peu d'études ont identifié des informations d'ordre zéro comme étant prises en compte pour intercepter un objet (Benguigui et al., sous presse). Comme nous l'avons vu dans l'introduction de cette expérience, l'utilisation d'une telle source d'information nécessite que la vitesse de la balle ne change pas d'un essai sur l'autre. C'est le cas dans de nombreuses situations sportives, dans lesquelles la vitesse de la balle à intercepter est relativement peu variable. Ainsi, lors de la réception d'une passe en sport collectif, la vitesse de la balle est généralement comprise dans une gamme de vitesse assez étroite et connue par les joueurs expérimentés. La deuxième contrainte de l'utilisation de ce type de tâche est que le temps de mouvement de l'effecteur ne varie pas ou peu d'un essai sur l'autre. Néanmoins, rappelons que, comme nous l'avons vu dans le cadre théorique, pour attraper une balle (par opposition à une frappe), la contrainte temporelle pour amener l'effecteur au bon endroit est moins importante. En effet, pour attraper une balle, la contrainte temporelle nécessite que la main arrive au point d'interception avant la balle, et non pas en même temps comme lorsqu'on cherche à frapper la balle. De ce fait, quelqu'un cherchant à attraper une balle ne peut pas arriver au point d'interception trop tôt, mais uniquement trop tard. Les caractéristiques d'une réception de passe en sport collectif (faible variabilité de la vitesse de la balle et faible contrainte temporelle) permettraient donc tout à fait l'utilisation d'une information d'ordre zéro. Les acteurs pourraient tout simplement initier leur geste quand la balle se situe à une certaine distance d'eux, et l'apprentissage d'une réception de la balle pour un joueur débutant

consisterait à minimiser la variabilité temporelle de son geste et repérer la distance à laquelle le geste doit être initié. Il conviendrait de déterminer si ces indices de position sont (1) fréquemment utilisés ou bien (2) utilisés en combinaison ou en remplacement d'autres informations qui donnent accès au TTC.

3.4 Conclusion du chapitre 3

Les résultats obtenus dans les trois expérimentations d'interception indirectes sont a priori assez surprenants et contradictoires. Contrairement à nos hypothèses initiales, les résultats de l'expérience 3 sont en contradiction avec une utilisation de TTC1 ou TTCg pour intercepter un objet en chute. La seule source d'information compatible avec l'erreur observée au premier essai est l'utilisation d'une source d'information d'ordre zéro reposant sur des informations de distance (cf. Benguigui et al., sous presse, pour des résultats contradictoires). L'expérience 5 a permis de souligner que des indices spatiaux permettaient notamment un meilleur taux d'interception et variabilité plus faible. Il apparaît donc que ce type d'information, qui ne donne pas accès au TTC puisse être utilisé notamment dans les premiers essais et quand elle est particulièrement accessible.

En revanche, l'expérience 4 basée sur l'utilisation d'essais pièges montre des différences interindividuelles dans l'information utilisée, TTC1, TTCg, ou la distance selon les participants. Ceci indiquerait que l'utilisation d'une information particulière est la conséquence d'une interaction entre plusieurs contraintes, comme les contraintes de la tâche (e.g., impossibilité de réguler son geste dans une tâche d'interception indirecte), les contraintes organiques (e.g., le niveau d'expertise des participants) et les contraintes environnementales (e.g., présence d'indices de position exploitables dans l'environnement) comme le propose Caljouw et al. (2004c), et expliquerait pourquoi certaines études identifient

différentes informations comme étant utilisées pour intercepter un objet (e.g., Michaels et al., 2001 ; van der Kamp et al., 1997).

Dans le chapitre 4, nous avons traité la question des sources d'information dans des tâches d'interception directe qui permettent la régulation. Nous avons testé les hypothèses de Zago et al. (2004) sur l'utilisation d'un modèle interne de la gravité pour intercepter une balle en chute libre en manipulant, dans l'expérience 6, la masse de l'objet afin de vérifier si cela était pris en compte, et en comparant, expérience 7, les interceptions d'une balle virtuelle et d'une balle réelle.

Chapitre 4

Gravité et actions d'interception directe

Chapitre 4 : Gravité et actions d'interception directe

Dans ce dernier chapitre expérimental, nous nous sommes intéressés à l'influence de la gravité dans les actions d'interception directe. Ces actions se distinguent des actions d'interception indirecte par la possibilité de réguler son geste en cours d'exécution, ce qui donne potentiellement la possibilité d'utiliser une information ne rendant pas compte initialement du TTC exact, comme par exemple TTC1. Il faut noter que c'est principalement sur la base de ce type de tâche qu'a été proposée l'existence d'un modèle interne de la gravité (e.g., McIntyre et al., 2001a, Zago et al., 2004).

4.1 Expérimentation 6

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, la valeur de l'accélération d'une balle en chute libre n'est pas constante, mais diminue sous l'effet de la résistance de l'air. De ce fait, l'internalisation d'une valeur constante d'accélération de 9.81 m/s² ne permettrait pas d'intercepter correctement une balle en chute libre, mais amènerait la main systématiquement en avance au point d'interception lorsque la balle est fortement soumise à la résistance de l'air (e.g., une balle en tennis de table). Pour intercepter une balle sur un mode prédictif, il serait nécessaire de prendre aussi en compte la résistance de l'air appliquée à cette balle, elle-même dépendante de la masse de la balle.

4.1.1 Problématique

Nous avons donc cherché à déterminer si la résistance de l'air est utilisée dans le timing des actions d'interception. Une réponse positive permettrait de valider l'utilisation de TTCg, tandis qu'une réponse négative contredirait son utilisation ou limiterait considérablement l'intérêt d'une telle utilisation. Pour cela, nous avons utilisé une tâche d'interception directe (permettant la régulation du geste jusqu'au contact), dans laquelle la

moitié des participants connaissaient la masse de la balle à intercepter tandis que l'autre moitié avait eu une information erronée sur la masse.

La prise en compte de la résistance de l'air dans le timing d'interception (condition nécessaire pour utiliser TTCg sur un mode prédictif) devrait se traduire par des performances différentes dans les deux groupes (erreur commise et/ou paramètres du mouvement). En revanche, la non-prise en compte de la résistance de l'air dans le timing de l'interception (signifiant la nécessité de régulation pour ajuster le mouvement en cas d'effet de la résistance de l'air) devait se traduire par des résultats similaires pour les deux groupes.

4.1.2 Protocole expérimental

Dans cette expérience, 28 participants (16 hommes et 12 femmes, âge moyen 22 ans ±2) ont été testés. Durant le test, les participants devaient intercepter une balle réelle en chute lorsqu'elle passait à un point d'interception prédéfini avec un intercepteur virtuel se déplaçant sur 1 degré de liberté. Dans le test, la balle était relâchée d'une hauteur de 2 mètres juste devant un écran blanc (Figure 35). La balle était en polystyrène, avait un diamètre de 6 cm et une masse de 2.5 g. Le temps de chute était de 718 ms, et la vitesse atteinte au point d'interception de 4.54 m/s. Une balle virtuelle non projetée sur l'écran et ayant les mêmes caractéristiques physiques et la même cinématique que la balle réelle (masse, diamètre, moment d'initiation, position, vitesse, accélération, effet de la résistance de l'air) était utilisée pour calculer les erreurs commises par les participants.

Les participants avaient comme consigne de frapper la balle avec l'effecteur virtuel en produisant un mouvement sans revenir en arrière. L'effecteur virtuel était constitué d'un cercle noir de 5 cm de diamètre projeté sur l'écran. Son point de départ était situé à 30 cm sur la gauche du point d'interception. Le point d'interception était matérialisé par un carré noir d'un cm de côté. Nous avons utilisé un intercepteur virtuel dans le but d'empêcher toute

influence éventuelle de la masse de l'objet sur l'anticipation du contact comme cela a été suggéré par Lacquaniti et Maioli (1989a) et aussi pour empêcher tout apprentissage des propriétés de la balle par un contact entre la balle et la main durant les premiers essais. Le mouvement de l'effecteur virtuel était contrôlé par un manipulandum déplacé à la main se déplaçant le long d'un rail perpendiculaire à la chute de la balle. Les mouvements de la main étaient enregistrés avec un système Flock of Birds© à une fréquence de 120 Hz et contrôlaient le mouvement de l'effecteur projeté sur l'écran avec un ratio de un (déplacement de la main d'un cm correspondant à un déplacement de l'effecteur d'un cm) et un délai constant de 30 ms, inférieur au délai de 45 ms trouvé par Vogels (2004) comme étant le délai minimal à partir duquel les participants sont capables du juger qu'un stimulus haptique et un stimulus visuel sont asynchrones. Les données de position issues du logiciel ont été filtrées par un filtre de deuxième ordre Butterworth avec une fréquence de coupure de 12 Hz, et ont servi à obtenir la vitesse et l'accélération de la main par dérivation.

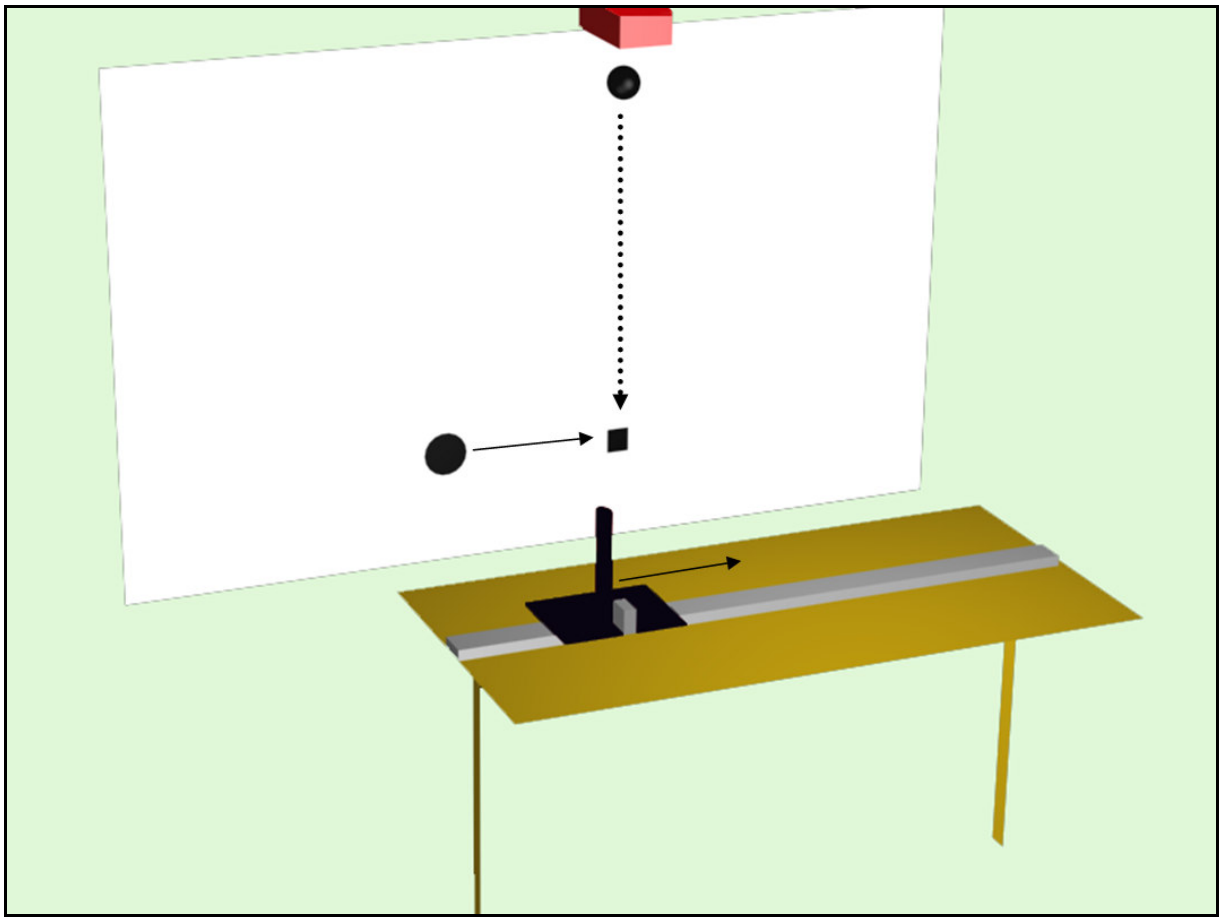


Figure 35 : Représentation (échelle arbitraire) du dispositif expérimental. La balle était relâchée en utilisant un électroaimant placé en haut de l'écran. La flèche en pointillé représente le mouvement de la balle. En bas de l'écran étaient projetés le point d'interception et l'effecteur (contrôlé par le manipulandum se déplaçant sur une dimension seulement et sur lequel était fixé le capteur du Flock of Birds©, connecté à la partie principale du Flock of Birds© et à un ordinateur non représentés ici). Les flèches solides représentent le mouvement synchronisé du manipulandum et de l'effecteur.

L'initiation d'un essai était faite par l'expérimentateur en pressant un bouton. Après un temps aléatoire de quelques secondes (de 3 à 6 s), la balle était relâchée par l'électroaimant. L'enregistrement de la position de l'effecteur en fonction du temps et le la chute de la balle (t0) était réalisé par un logiciel réalisé pour cette expérience en C++.

La précision temporelle de l'interception était calculée en ms par la différence entre le temps d'arrivée du centre de l'effecteur et le temps d'arrivée du centre de la balle (i.e., 718 ms) au point d'interception. Une erreur de 0 ms signifiait que les centres de la balle et de l'effecteur étaient arrivés en même temps au point d'interception. Une erreur positive

signifiait que le centre de l'effecteur était arrivé après le centre de la balle tandis qu'une erreur négative signifiait que le centre de l'effecteur était arrivé avant le centre de la balle.

Deux méthodes étaient utilisées pour déterminer les interceptions réussies. Nous avons tout d'abord défini une fenêtre temporelle pour donner un feedback aux participants après chaque essai, en utilisant l'équation (5) (page 45). Ceci a donné lieu à une fenêtre temporelle utilisée pour donner un feedback positif ou négatif aux participants de ±12 ms d'après $(T_b + T_i) / V_b = 24$ ms. Cependant, le calcul de l'erreur réalisé par le logiciel Interceptor considère une erreur nulle lorsque les centres de la balle et de l'effecteur sont superposés, ce qui ne correspond certainement pas à une interception d'objets réels comme habituellement réalisés par les participants, qui s'apparenterait plus à un contact des surfaces de la balle et de l'effecteur (Figure 36). Nous avons donc considéré qu'une interception était réussie lorsque toute partie de l'effecteur entrait en contact avec toute partie de la balle, et calculé la fenêtre temporelle correspondant à ces réussites. Cette fenêtre d'interception est dépendante de la vitesse de mouvement des participants, et a donc été calculée a posteriori.

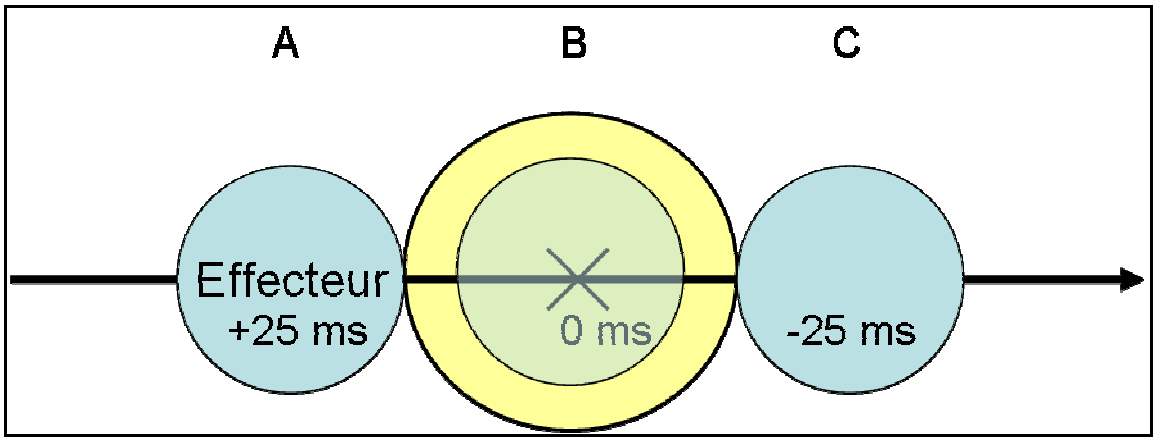


Figure 36 : Représentation de l'interception recherchée par les participants. Alors qu'une erreur de 0 ms correspond à la superposition des centres (situation B) de la balle (cercle jaune) et de l'effecteur (cercle vert), les participants ont plus certainement cherché à faire entrer en contact la partie antérieure de l'effecteur avec la balle (situation A), correspondant temporellement à une erreur positive supérieure à 0 ms. Les valeurs de -25 ms et 25 ms sont données à titre d'illustration.

Nous avons donc deux fenêtres temporelles, l'une calculée a priori pour être assuré du contact effectif et correspondant au feedback donné aux participants et l'autre calculée a posteriori en fonction de la vitesse de la balle et de l'effecteur à proximité de la zone d'interception et correspondant véritablement à la réussite ou à l'échec dans l'interception.

Avant la session expérimentale, les participants recevaient un entraînement avec une balle virtuelle à intercepter se déplaçant horizontalement de la droite vers la gauche vers le point d'interception. La balle virtuelle et l'effecteur étaient projetés de l'arrière de l'écran par un vidéo-projecteur. Dans ces essais, la balle partait d'un point de départ placé à 80 cm sur la droite du point d'interception, et pouvait adopter différentes vitesses initiales : 1.21; 1.14; 1.08 et 1.02 m/s, menant à des TTCs de respectivement 660; 700; 740 et 780 ms. Le point d'interception et l'effecteur avaient exactement les mêmes positions que pendant le test. Le déroulement de la session d'entraînement était exactement le même que dans le test décrit ci-dessus et les participants avaient le même feedback sur leur réponse. Le but principal de la session d'entraînement était de permettre aux participants d'intégrer les propriétés de l'effecteur virtuel (i.e., le ratio de 1 et le délai de 30 ms entre le mouvement et l'affichage à l'écran. Ce délai est très faible, et à tel point que Cunningham, Billock et Tsou (2001) considèrent un délai de 35 ms dans une tâche de conduite d'un objet comme une condition sans délai. En tout état de cause, l'adaptation à ce décalage de 30 ms devrait être très rapide selon les travaux de Morice, Siegler, Bardy et Warren (2007), qui dans un mouvement cyclique de rebond de balle sur une raquette ont introduit des délais de phase entre le mouvement de la raquette physique et de la raquette virtuelle bien plus importants, de 45° à 180°. Lorsque le délai est faible (45° de phase, correspondant à un délai de 83.75 ms), les participants s'adaptent très vite après quelques essais seulement et obtiennent les mêmes performances que dans la condition sans délai). Tous les participants devaient d'abord réaliser

un bloc de cinq essais puis autant de blocs que nécessaires pour réaliser trois interceptions sur un bloc de cinq essais. En moyenne, ce critère a été atteint au quatrième bloc d'essai.

Après cette session d'entraînement et durant une minute, les participants devaient manipuler et jeter en l'air la balle à intercepter pour connaître ses propriétés physiques (masse, texture, taille notamment). Deux balles différentes étaient utilisées dans cet entraînement pour chacun des deux groupes. Un premier groupe de participants (N = 14) devaient manipuler la balle à intercepter décrite plus haut (masse de 2.5 g) alors que l'autre groupe (N = 14) devait manipuler une balle visuellement identique mais ayant une masse ajoutée en son centre. La masse de cette seconde balle était de 20 g. Puisque seule la balle légère était interceptée durant le test, le premier groupe avait une information correcte sur la masse de la balle tandis que le second groupe avait une information erronée. Pendant le test, les participants devaient réaliser 20 essais. Pour chaque essai, un feedback verbal qualitatif leur était donné sur leur réponse (i.e., balle interceptée selon la fenêtre temporelle calculée a priori, trop tôt ou trop tard).

Nous avons manipulé la pré-information pour tester si une connaissance sur la masse de la balle était utilisée pour prédire le TTC de la balle et contrôler le timing de l'action. L'utilisation de l'équation différentielle $\frac{dv}{dt} = g - \frac{kv^2}{m}$ a permis de calculer la cinématique de la balle en fonction de la masse de 2.5 et 20 g. Ces calculs ont permis d'obtenir un TTC de 718 ms pour la balle légère et un TTC de 648 ms pour la balle lourde (le temps de chute sans résistance de l'air aurait été de 639 ms). Ces calculs ont été vérifiés empiriquement à l'aide d'une caméra fonctionnant à une fréquence de 50 Hz. Nous avons aussi vérifié que le départ de la balle réelle et de la balle virtuelle étaient bien synchronisés au moyen d'un accéléromètre placé sur l'électro-aimant et d'une cellule photo-électrique.

Chapitre 4 : Gravité et actions d'interception directe

Cinq variables dépendantes ont été analysées pour détecter l'influence d'une pré-information concernant la masse de la balle sur les actions d'interception (voir figure 37). Le moment d'initiation (MI) correspondait au temps qui s'écoulait entre le départ de la balle et le moment où la vitesse de la main atteint 5% de la vitesse maximale au cours de l'essai. Le temps de mouvement (TM) correspondait au temps entre l'initiation du geste et le moment où la main franchissait le point d'interception. L'erreur constante (EC) correspondait à la différence entre la somme MI + TM et le temps mis par la balle pour atteindre le point d'interception. Une erreur positive correspondait à l'arrivée de l'effecteur après la balle alors qu'une erreur négative correspondait à l'arrivée de l'effecteur avant la balle. L'erreur absolue (EA) correspondait à la moyenne des EC sans leur signe. Le taux d'interception $TI_{Feedback}$ correspondait au pourcentage d'essais pour lesquels l'erreur était comprise dans la fenêtre temporelle de ±12 ms utilisée pour donner un feedback aux participants alors que le $TI_{Contact}$ correspondait au pourcentage d'essais pour lesquels un contact avait eu lieu entre l'effecteur et la balle. Enfin, nous avons analysé l'erreur initiale (EI) qui correspondait à l'erreur commise au premier essai, exprimé en EC et EA.

Ce premier essai était particulièrement intéressant dans la mesure où la cinématique de la balle était encore inconnue et le mouvement non modulé par la présentation d'un essai précédent. La prise en compte de la masse de la balle ou non dans le timing du mouvement d'interception devait être particulièrement détectable dans ce premier essai. Pour estimer TTC, différentes sources d'informations étaient théoriquement possibles. Les participants pouvaient utiliser des informations donnant accès à TTC1, TTCg négligeant la résistance de l'air ou encore TTCg incluant la résistance de l'air. Si les participants utilisaient une information donnant accès à TTC1, l'erreur commise au premier essai devait être indépendante de la pré-information et positive (arrivée en retard de l'effecteur) car l'accélération de la balle n'est pas prise en compte. Si les participants utilisaient TTCg

négligeant la résistance de l'air, l'erreur commise au premier essai devrait être indépendante de la pré-information et négative (arrivée en avance de l'effecteur) car les participants ne prennent pas en compte la diminution de l'accélération du fait de la résistance de l'air. Enfin, si les participants basaient leur réponse sur TTCg incluant la résistance de l'air, l'erreur commise au premier essai devait être dépendante de la pré-information. Pour les participants ayant reçu une bonne pré-information sur la masse de la balle, aucune erreur ne devait être commise. Au contraire, pour les participants ayant reçu une mauvaise pré-information, des erreurs négatives devaient être commises (arrivée en avance de l'effecteur). Les participants devaient dans ce cas anticiper une moindre résistance de l'air et donc une moindre diminution de l'accélération de la balle.

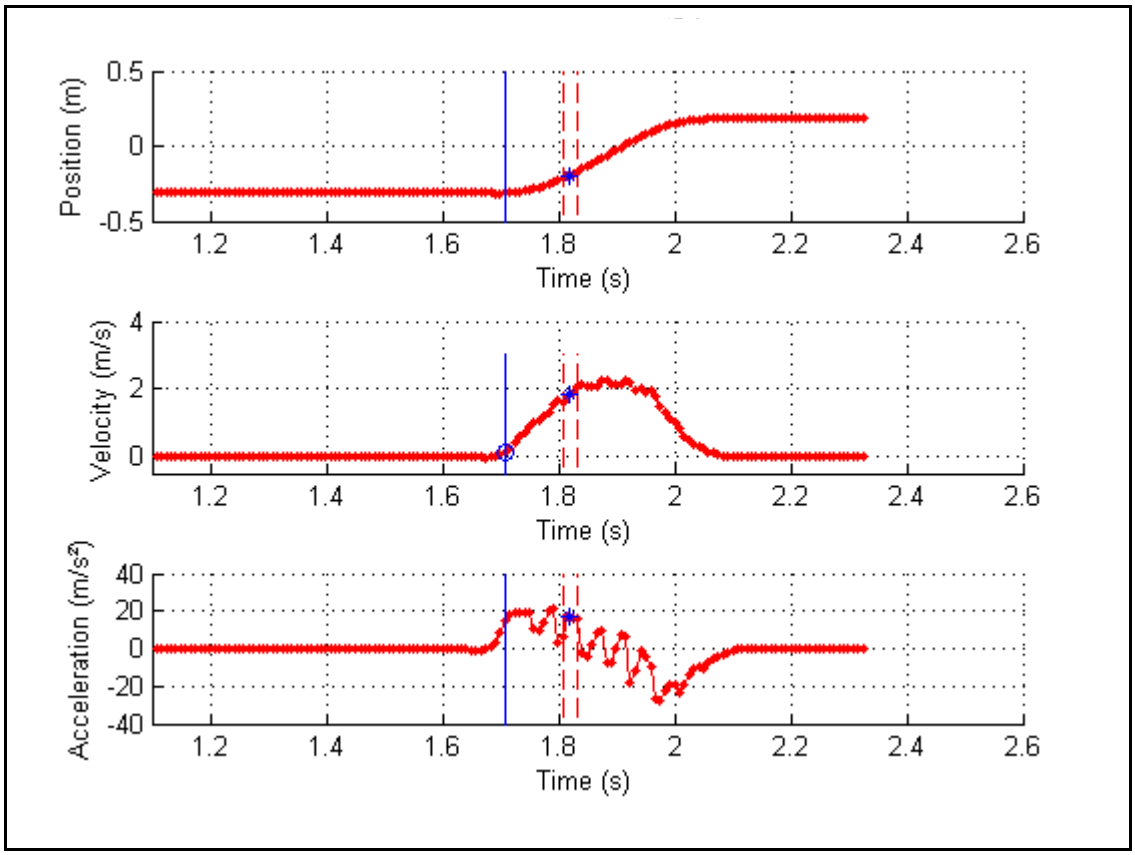


Figure 37 : Courbes cinématiques d'un participant à un essai. Sur cette figure, la balle commence sa chute à t = 0, le trait bleu correspond au moment d'initiation du geste (moment où la vitesse de la main atteint 5 % de la vitesse maximale de l'essai) et les traits hachurés rouges correspondent à la fenêtre temporelle. L'étoile bleue correspond au passage de la balle au point d'interception. La main passe le point d'interception lorsqu'elle atteint une position de 0. L'essai est considéré comme réussi si la main passe la position 0 pendant la fenêtre temporelle (entre les lignes rouges hachurées). La durée du mouvement correspond au temps entre la ligne bleue et le passage de la main à la position 0.

Les EC ont été soumises au même filtrage que dans l'expérience 3. Un total de 3.21% des essais ont été remplacés dans la condition de bonne pré-information et 3.92% dans la condition de mauvaise pré-information. Aucune erreur initiale n'a été modifiée par ce filtrage.

MI, TM, EC et EA ont été analysés séparément dans une ANOVA au plan S⟨Pré-information (2)⟩× Répétition (20) avec Pré-information (bonne pré-information vs. mauvaise pré-information) en facteur inter sujet et Répétition (Essai 1 vs. … vs. Essai 20) en facteur intra sujet. Nous avons aussi réalisé un t de student comparant les deux groupes de pré-

information sur $TI_{Feedback}$, $TI_{Contact}$ et IE. Pour tous les tests statistiques, un seuil de significativité alpha de .05 a été utilisé et des tests post hoc de Newman-Keuls ont été réalisés pour identifier l'origine des différences significatives.

4.1.3 Résultats

Les ANOVAs n'ont pas montré d'effet de la pré-information sur les paramètres du mouvement (Figure 38), ni sur MI, $F(1, 26) < 1$, ni sur TM, $F(1, 26) < 1$. Nous n'avons pas non plus trouvé d'effet significatif de la répétition sur MI, $F(19, 494) = 1.40$, $p > .05$, ou sur TM, $F(19, 494) = 1.53$, $p > .05$, bien que le seuil de significativité soit proche d'être atteint pour l'analyse de TM ($p=.07$). De plus, $TI_{Feedback}$ n'est pas significativement différent selon la condition de pré-information $t(26) = 1.66$, $p > .05$ (respectivement 19 % ±12 et 13 % ±9 pour les groupes *bonne pré-information* et *mauvaise pré-information*). De manière identique, $TI_{Contact}$ n'est pas différent selon la pré-information, $t(26) = 0.93$, $p > 0.05$, (respectivement 41 % ± 18 et 35 % ± 17 pour les groupes *bonne pré-information* et *mauvaise pré-information*). En moyenne, l'effecteur entre en contact avec la balle pour une erreur comprise entre $IC_{.95}$ = [-7 ms; 20 ms] pour le groupe *bonne pré-information* et pour une erreur comprise entre $IC_{.95}$ = [-6 ms; 19 ms] pour le groupe *mauvaise pré-information* (Figure 39).

Une ANOVA sur EC ne montre pas d'effet significatif de la pré-information, $F(1, 26)<1$, un effet significatif de la répétition, $F(19, 494) = 3.98$, $p < .05$, et pas d'interaction significative Pré-information × Répétition, $F(19, 494) = 1.07$, $p > .05$. Le test post hoc de Newman-Keuls montre que les essais 1 et 2 diffèrent des essais 5-6 et 10-20, tandis que les essais 3 et 4 diffèrent de l'essai 20. Ceci montre qu'il n'y a plus d'apprentissage dès le cinquième essai. La même analyse sur EA montre exactement le même pattern de résultat.

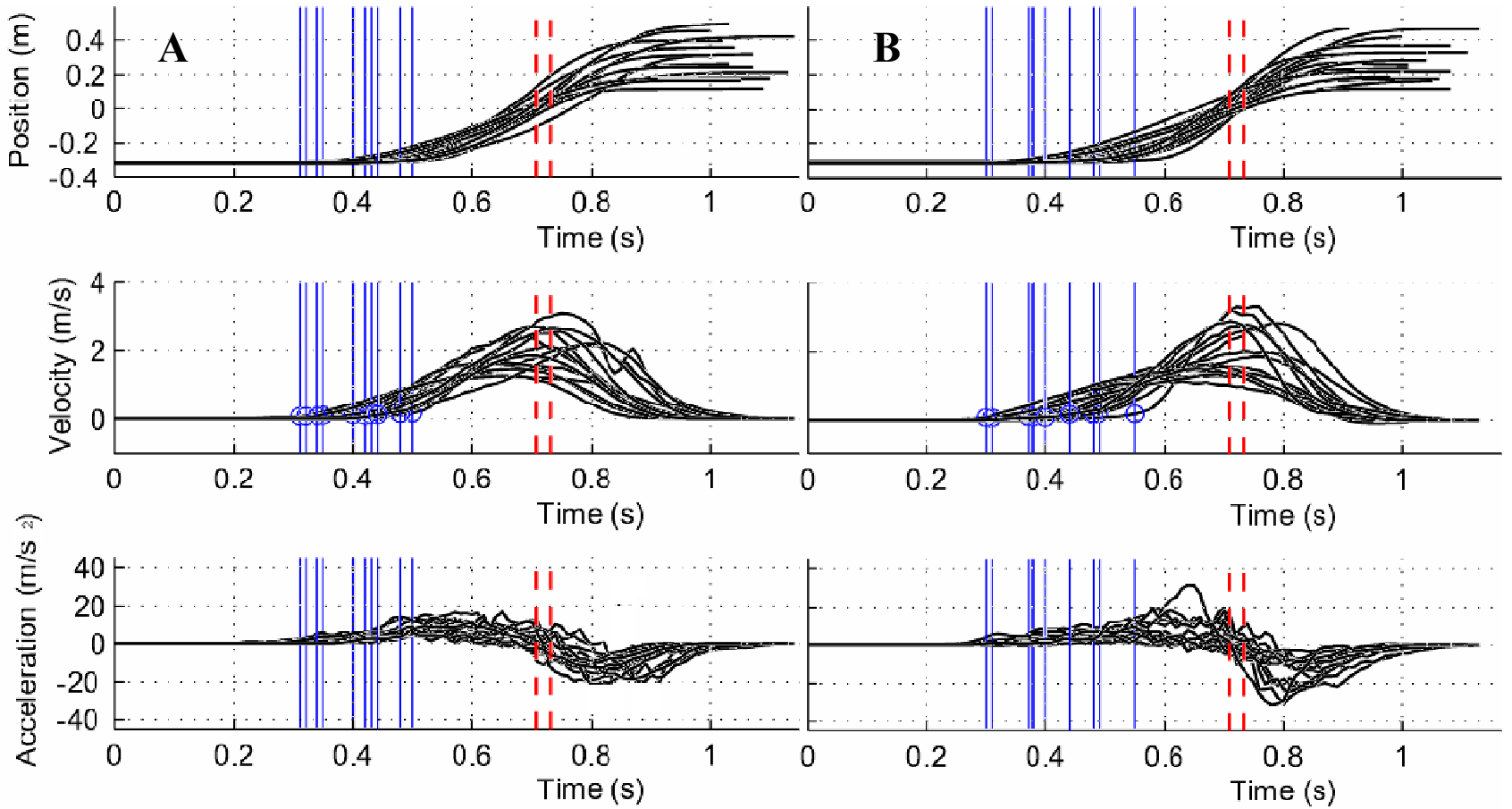


Figure 38 : courbes cinématiques moyennes de tous les participants du groupe bonne pré-information (A) et mauvaise pré-information (B).

Le t de student montre que l'EC au premier essai (95 ms pour le groupe *bonne pré-information* et 58 ms pour le groupe *mauvaise pré-information*) ne dépend pas de la pré-information, $t(26) = 0.93$, $p > .05$. Le pattern d'erreur initiale (erreur positive et indépendante de la pré-information) est cohérent avec l'utilisation de TTC1 et contredit l'utilisation de TTCg négligeant ou incluant la résistance de l'air.

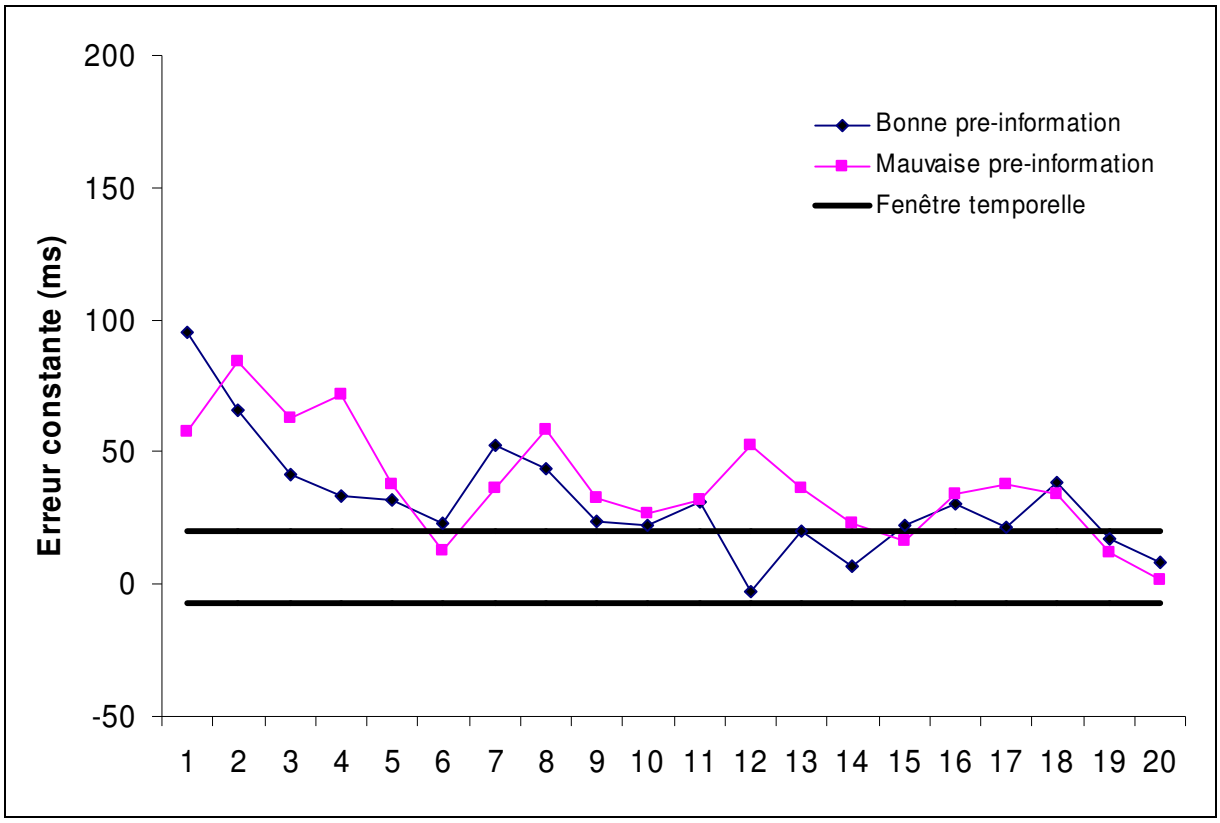


Figure 39 : Evolution d'EC pour la condition de bonne pré-information et mauvaise pré-information. Les lignes noires correspondent à la fenêtre d'interception IC_{95}= [-7 ms : 20 ms] pour lequel l'effecteur entre en contact avec la balle.

4.1.4 Conclusions

Tout d'abord, les résultats montrent que l'erreur moyenne est la même pour les deux groupes de pré-information, et tend à se situer autour d'une valeur de 20 ms (Figure 39). Cette valeur est a priori surprenante car l'apprentissage des participants via la répétition des essais aurait dû nous faire observer une erreur moyenne en fin de session proche de 0 ms. Cette valeur de 20 ms correspond en fait à la partie supérieure de l'intervalle de confiance de la

fenêtre d'interception ($IC_{.95}$= [-7 ms : 20 ms]) pour laquelle l'effecteur entre en contact avec la balle. Cela confirme que les participants cherchent à faire entrer en contact la surface antérieure de l'effecteur avec la balle, correspondant à la situation A de la figure 36, et explique ainsi pourquoi l'erreur moyenne est éloignée de 0 ms, ce qui aurait correspondu à la superposition des centres de l'effecteur et de la balle (situation B de la figure 36). L' « erreur » de 20 ms correspond en fait à la situation recherchée par les participants et n'est donc pas à véritablement parler une erreur.

Concernant l'hypothèse de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité, les résultats de l'expérience 5 montrent qu'un a priori sur la masse d'une balle en chute libre n'est pas pris en compte dans le timing des actions d'interception. Aucune différence n'est apparue entre les deux conditions de pré-information sur aucune des variables étudiées, aussi bien pour les variables rendant compte de la cinématique du mouvement d'interception (MI, TM) que pour les variables rendant compte de la performance des participants (EC, EA, $TI_{Feedback}$, $TI_{Contact}$ et IE). De plus, l'erreur commise au premier essai contredit l'utilisation de TTCg, négligeant ou incluant la résistance de l'air, et plaide en faveur d'une utilisation de TTC1.

La masse de la balle n'ayant aucune influence sur le timing des actions d'interception, la résistance de l'air ne peut donc pas être prise en compte. Cette observation dément de ce fait l'utilisation d'un modèle interne de la gravité donnant accès quantitativement à TTCg, qui aurait eu pour conséquence d'amener l'effecteur systématiquement en avance au point d'interception, prédiction très différente des résultats observés.

Chapitre 4 : Gravité et actions d'interception directe

4.2 Expérimentation 7

4.2.1 Problématique

Dans une deuxième expérience, nous avons voulu déterminer l'influence de l'utilisation de balle réelle ou virtuelle sur le timing des actions d'interception. Selon Zago et al. (2004), le modèle interne de la gravité ne serait utilisé que pour des balles réelles (possédant une masse) car soumises à l'accélération gravitaire. Au contraire, dans des simulations virtuelles, fréquemment utilisées dans des conditions expérimentales, le modèle interne ne serait pas mis en jeu car les balles virtuelles (sans masse) ne seraient pas perçues comme soumises à la gravité. Au plan comportemental, cela signifierait que l'acteur devrait utiliser un modèle 0g prédisant une chute à vitesse constante.

L'expérience 6 a permis de montrer que la masse de la balle n'est pas prise en compte dans le timing des actions d'interception. Cependant, cette expérience comparait l'interception de deux balles possédant toutes deux une masse. Si l'on suit la proposition de Zago et al. (2004), il reste donc possible d'observer une différence dans le timing des actions d'interception en comparant une balle réelle possédant une masse et une balle virtuelle sans masse. Néanmoins, comme nous l'avons proposé dans le cadre théorique (Chapitre 1 page 45), nous faisons l'hypothèse que les résultats obtenus par Zago et al. (2004) proviennent essentiellement d'une ambigüité entre la fenêtre temporelle d'interception pour la balle virtuelle et celle effectivement utilisable pour la balle réelle. Une expérience d'interception d'une balle réelle ou d'une balle virtuelle présentant toutes les deux la même fenêtre temporelle d'interception permettra donc de déterminer si les résultats de Zago et al. (2004) proviennent bien de l'utilisation d'un modèle 1g ou 0g selon que la balle est réelle ou virtuelle ; ou s'ils peuvent être expliqués par un problème méthodologique de fenêtre temporelle non contrôlée.

4.2.2 Protocole expérimental

Dans l'expérience 7, 32 participants (20 hommes et 12 femmes, âge moyen de 25 ans ±4) qui n'ont pas participé à l'expérience 5 ont été testés. Comme dans l'expérience 5, la tâche requérait d'intercepter avec un effecteur virtuel projeté sur un écran une balle en chute libre lorsque celle-ci passait à un point d'interception prédéfini (Figure 35).

La balle en chute pouvait être soit réelle soit virtuelle. La balle réelle avait un diamètre de 4 cm et une masse de 30 g. Elle était relâchée par un électroaimant juste devant un écran blanc. Dans cette condition, une balle virtuelle non projetée sur l'écran et ayant les mêmes caractéristiques physiques et la même cinématique que la balle réelle (masse, diamètre, moment d'initiation, position, vitesse, accélération, effet de la résistance de l'air) était utilisée pour calculer les erreurs commises par les participants.

Lorsque la balle était virtuelle, celle-ci avait le même diamètre et était projetée par derrière sur l'écran blanc. Dans les deux conditions, la balle tombait d'une hauteur de 1.75 m avec une vitesse initiale nulle. Le déplacement des deux balles était accéléré par la gravité et soumise à la résistance de l'air. Les deux balles atteignaient une vitesse de 5.79 m/s au point d'interception après un temps de chute de 600 ms. L'effecteur avait les mêmes propriétés que dans l'expérience 6 (diamètre de 5 cm et point de départ à 30 cm sur la gauche du point d'interception). Les erreurs temporelles et les interceptions réussies étaient calculées de la même manière que dans l'expérience 6, avec une fenêtre temporelle calculée a priori utilisée pour donner un feedback positif ou négatif aux participants de ±8 ms d'après $(T_b + T_i) / V_b$ = 16 ms, ainsi qu'une deuxième correspondant aux performances ayant permis d'intercepter la balle et calculée a posteriori.

Des mesures avec une caméra à 50 Hz, un accéléromètre et une cellule photo-électrique ont montré que les balles réelles et virtuelles étaient relâchées en même temps et

avaient la même cinématique. La session d'entraînement était la même que dans l'expérience 6. Le dispositif expérimental du mouvement à produire et de l'enregistrement de ce mouvement était identique à celui utilisé dans l'expérience 6.

Après la session d'entraînement, un premier groupe de participants réalisait 50 essais avec la balle réelle (groupe *balle réelle* BR ; N = 16) tandis qu'un second groupe de participants réalisaient 50 essais avec la balle virtuelle (groupe *balle virtuelle* BV ; N = 16). Cinq minutes après le test, la moitié des participants du groupe BR réalisaient un post test de 20 essais avec une balle réelle (groupe BR-BR) tandis que l'autre moitié réalisaient 20 essais avec la balle virtuelle (groupe BR-BV). Inversement, la moitié des participants du BV réalisaient un post test de 20 essais avec la balle réelle (groupe BV-BR) tandis que l'autre moitié réalisaient 20 essais avec la balle virtuelle (groupe BV-BV). Enfin, sept jours plus tard, tous les participants réalisaient un second post test de 20 essais dans la même condition que leur premier post test.

Comme dans l'expérience 6, les données d'EC ont été soumises à un filtrage des erreurs atypiques suivant la même méthode (voir annexe C pour la méthode). Cela a mené au remplacement de 2.85% des essais réalisés avec la balle réelle et 2.71% des essais réalisés avec la balle virtuelle, au test et au post test.

Les mêmes variables dépendantes que dans l'expérience 6 ont été analysées. MI, TM, EC et EA ont été analysés séparément dans une ANOVA au plan S⟨Condition de balle (2)⟩ × Répétition (50) avec Condition de balle (balle réelle vs. balle virtuelle) en facteur inter sujet et Répétition (Essai 1 vs. … vs. Essai 50) en facteur intra sujet. Nous avons aussi réalisé un t de student entre les groupes de condition de balle (*balle réelle* vs. *balle virtuelle*) sur $TI_{Feedback}$, $TI_{Contact}$ et EI. Pour tous les tests statistiques, un seuil de significativité alpha de .05 a été

utilisé et des tests post hoc de Newman-Keuls ont été réalisés pour identifier l'origine des différences significatives.

4.2.3 Résultats

Les ANOVAs sur les paramètres cinématiques du mouvement (Figure 40) ne montrent pas de différence dans MI selon la condition de la balle $F(1, 30) = 2.04$, $p > .05$, mais une évolution de MI avec la répétition des essais, $F(49, 1470) = 2.13$, $p < .05$. Un test post hoc montre que seul le MI du premier essai est différent du MI de chacun des autres essais. L'ANOVA sur TM a mis en évidence une différence dans TM selon la condition de la balle, $F(1, 30) = 6.96$, $p < .05$, TM étant significativement inférieur dans la condition de *balle réelle* (205 ms ±40) que dans la condition de *balle virtuelle* (236 ms ±52). L'ANOVA montre aussi une évolution de TM avec la répétition, $F(49, 1470) = 5.12$, $p < .05$. Le test post hoc montre que TM du premier essai diffère de celui de tous les autres essais, TM de l'essai 2 diffère de celui de tous les autres essais à l'exception des essais 3, 4 et 6, et que dès l'essai 7 il n'y a plus d'évolution significative de TM. De plus, aucune différence n'a été trouvée dans $TI_{Feedback}$ selon la condition de balle, $t(30) = -1.5$, $p > .05$ (respectivement 10 % ±4 et 13 % ±5 pour la balle réelle et la balle virtuelle). Cependant, $TI_{Contact}$ est significativement différent selon la condition de balle, $t(30) = -2.65$, $p < .05$, avec respectivement 25 % ±8 et 36 % ±15 pour la balle réelle et la balle virtuelle. En moyenne, l'effecteur entre en contact avec la balle pour une erreur comprise dans $IC_{.95}$ = [1 ms; 13 ms] pour le groupe *balle réelle* et pour une erreur comprise dans $IC_{.95}$ = [0 ms ; 14 ms] pour le groupe *balle virtuelle* (Figure 41).

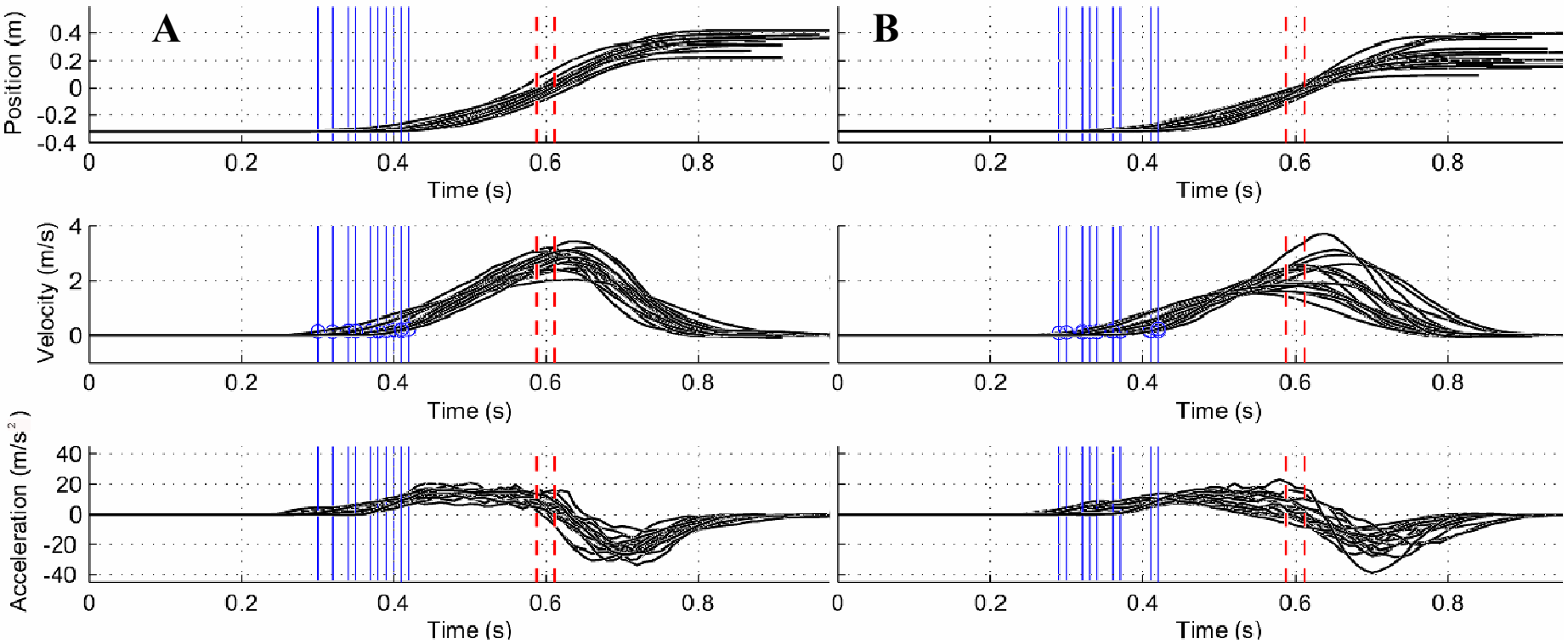


Figure 40 : courbes cinématiques moyennes de tous les participants du groupe balle réelle (A) et balle virtuelle (B).

Les résultats ne montrent aucune différence d'EC selon la condition de balle, $F(1, 30) = 1.09$, $p > .05$, mais un effet significatif de la répétition, $F(49, 1470) = 10.13$, $p < .05$. Un test post hoc montre que les essais 1 et 2 sont différents de tous les autres essais, que l'essai 3 est différent de tous les autres essais à l'exception des essais 4-6 ; 8 et 14 et ne montre plus aucune différence entre les erreurs à partir de l'essai 8. L'ANOVA montre aussi une interaction *condition de balle* × *répétition*, $F(49, 1470) = 2.17$, $p < .05$, mais le test post hoc ne montre aucune différence dans les erreurs pour des essais de même rang (i.e., pas de différence entre les essais 1 des groupes *balle réelle* vs. *balle virtuelle*, pas de différence entre les essais 2, etc.) (Figure 41). L'analyse d'EA montre le même pattern de résultat. Par conséquent, nous avons jugé qu'il n'était pas nécessaire de présenter ces résultats.

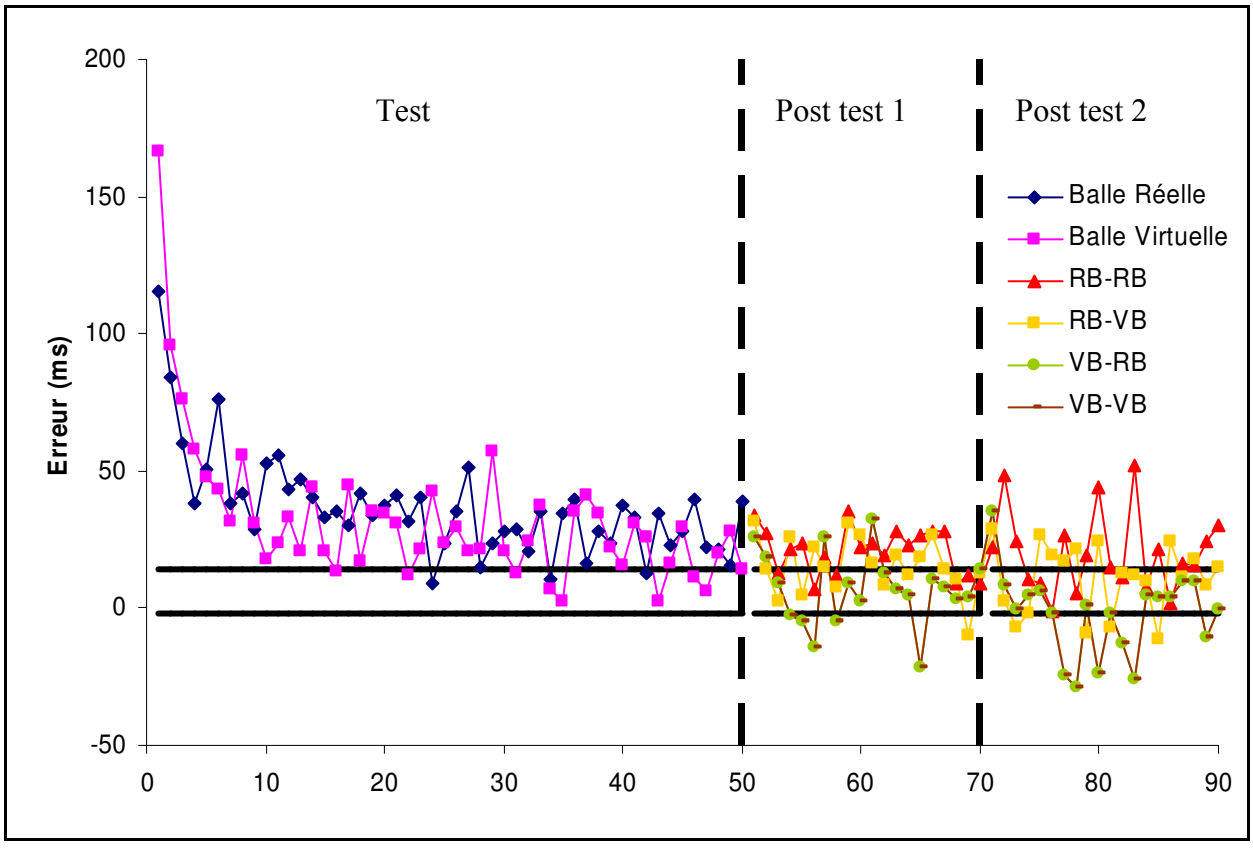


Figure 41 : Evolution d'EC pour la balle réelle et virtuelle dans le test, post test 1 et post test 2. Les lignes noires solides correspondent à la fenêtre d'interception IC_{95}= [-2 ms ; 14 ms] pour laquelle l'effecteur entre en contact avec la balle.

Enfin, un test de student sur l'EI ne montre aucun effet de la condition de balle, $t(30) = -1.94$, $p > .05$, respectivement 116 et 167 ms pour la *balle réelle* et la *balle virtuelle*, même si le seuil de significativité est très proche d'être atteint ($p=.06$). De plus, EI est significativement différente de 0, $t(15) = 6.80$, $p < .05$ et $t(15) = 8.32$, $p < .05$ pour la *balle réelle* et *balle virtuelle* respectivement, ce qui indique que les participants n'ont pas un bon timing dès le premier essai mais doivent l'acquérir avec la répétition.

Dans les post test 1 et 2, les variables MI, TM, et EC ont été analysées séparément dans une ANOVA avec le plan S⟨Balle dans le test (2) × Balle dans le post test (2)⟩ × Répétition (20), et les variables $TI_{Feedback}$, $TI_{Contact}$ et EI avec le plan S⟨Balle dans le test (2) × Balle dans le post test (2)⟩.

Dans l'ensemble, les résultats montrent peu de différences significatives. Il apparaît néanmoins une interaction condition de balle dans le test × condition de balle dans le post test 2 sur $TI_{Feedback}$, $F(1, 28) = 7.73$, $p < .05$, et le test post hoc montre que le $TI_{Feedback}$ du groupe BV-BR est plus faible que celui du groupe BV-BV. De plus, le type de balle utilisée dans le post test influence significativement EC dans le post test 1 et 2, $F(1, 28) = 4.32$, $p < .05$ et $F(1, 28) = 19.17$, $p < .05$ respectivement, montrant que les erreurs sont plus faibles lorsque les participants réalisent un post test virtuel plutôt qu'un post test réel. De plus, L'ANOVA montre un effet d'interaction *Balle du test* × *Balle du post test* sur l'EC du post test 2, $F(1, 28) = 4.58$, $p < 0.05$, montrant que l'EC est plus faible pour le groupe BV-BV que pour tous les autres groupes. En moyenne, l'effecteur entre en contact avec la balle pour une erreur comprise dans $IC_{.95}$ = [-3 ms; 14 ms] pour le post test dans la condition *balle réelle* et pour une erreur comprise dans $IC_{.95}$ = [-5 ms ; 16 ms] pour le post test dans la condition *balle virtuelle*.

4.2.4 Conclusions

Selon Zago et al. (2004), l'utilisation d'une balle réelle active le modèle interne de la gravité alors qu'une balle virtuelle active un modèle de vitesse constante. Puisque les balles utilisées dans cette expérience accéléraient à 1g, nous aurions dû observer des différences importantes dans le timing des interceptions, au moins dans les premiers essais : des réponses correctes pour la balle réelle mais en retard lors de l'interception de la balle virtuelle. Les résultats d'erreur temporelle ne montrent qu'un effet marginal du type de balle sur l'EI, mais aucune différence significative dans le timing de l'interception pour attraper une balle réelle ou virtuelle, contredisant cette hypothèse. L'absence de différence dans l'erreur temporelle (EC) selon l'utilisation d'une balle réelle ou virtuelle peut apparaître en contradiction avec la différence significative trouvée dans le taux d'interception calculé lorsque toute partie de l'effecteur entre en contact avec toute partie de la balle ($TI_{Contact}$). Cependant, cette dernière observation est à mettre en relation avec la différence trouvée dans TM. Puisque la distance parcourue par l'effecteur est la même que la balle à intercepter soit réelle ou virtuelle, cette différence dans TM signifie que la vitesse moyenne du mouvement est différente selon le type de balle à intercepter. En conséquence, puisque TM est plus court pour la balle réelle, la vitesse moyenne du mouvement est plus élevée dans cette même condition. La vitesse moyenne étant plus élevée dans la condition de balle réelle, cela signifie que pour une même erreur temporelle commise, l'effecteur est plus loin du point d'interception dans la condition de balle réelle que dans la condition de balle virtuelle, et donc que pour la balle virtuelle une erreur temporelle donnée peut permettre une interception alors que la même erreur temporelle ne permet pas l'interception de la balle réelle (Figure 42). La différence trouvée dans $TI_{Contact}$ provient donc de la différence dans TM.

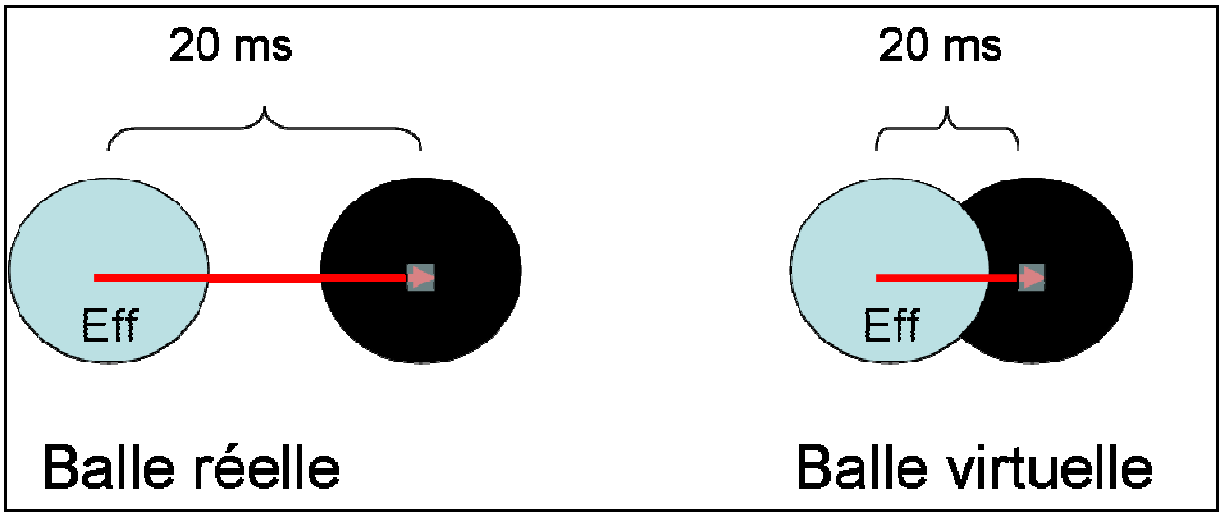


Figure 42 : Lorsque la balle est réelle, la vitesse du mouvement d'interception est élevée. En conséquence, pour une erreur de 20 ms par exemple, l'effecteur (cercle vert) est loin de la balle (cercle noir) lorsque celle-ci atteint le point d'interception (carré gris), et l'interception est considérée comme manquée. Lorsque la balle est virtuelle, la vitesse du mouvement d'interception est faible. En conséquence, pour la même erreur de 20 ms, l'effecteur est en contact avec la balle lorsque celle-ci est au point d'interception, et l'interception est considérée comme réussie. La même erreur temporelle donne donc lieu à une interception réussie ou manquée selon la vitesse de déplacement de l'effecteur.

Les résultats de l'expérience 7 montrent que l'utilisation d'une balle virtuelle plutôt qu'une balle réelle ne change que très peu de chose dans le timing des actions d'interception. L'absence de différence significative pour EC selon la condition de balle contredit l'utilisation de deux modèles distincts pour intercepter une balle réelle ou virtuelle. Cependant, l'observation d'une différence dans la vitesse du geste d'interception (TM), menant à un taux d'interception significativement supérieur lors de l'interception d'une balle virtuelle, reste à expliquer. Ce résultat pourrait sembler en faveur de l'utilisation d'un modèle interne de la gravité. Cependant, deux observations invalident cette hypothèse. Premièrement, toutes les autres variables contredisent le modèle interne de la gravité, et notamment l'absence de différence dans EC. De plus, il est important de noter que ce résultat, inattendu, est à l'opposé de celui prédit par l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité. En effet, celui-ci prédit que si la balle à intercepter accélère à 1g, les participants obtiennent de

meilleurs résultats lorsque la balle à intercepter est réelle que si elle est virtuelle, or, nous observons exactement l'inverse de cette prédiction.

4.3 Conclusion du chapitre 4

Les résultats du chapitre 4 s'opposent très clairement aux résultats et aux conclusions de Zago et al. (2004) sur l'utilisation d'un modèle interne de la gravité. L'expérience 6 a montré que la résistance de l'air appliquée à un objet et déterminant (entre autres) son TTC n'était pas prise en compte dans le timing d'interception. De plus, les résultats ont montré que le modèle interne de la gravité n'était pas utilisé. Cette utilisation aurait du se traduire par l'arrivée de l'effecteur en avance au point d'interception du fait de l'absence de prise en compte de la diminution de l'accélération au cours de la chute liée à la résistance de l'air. Cela n'a pas été le cas.

Bien que l'expérience 7 ait montré une différence au niveau des TM susceptible de valider l'hypothèse de Zago et al. (2004) concernant la mise en jeu du modèle interne de la gravité seulement pour les balles réelles et non pour les balles virtuelles, toutes les autres variables valident l'hypothèse inverse. Cela confirme donc notre hypothèse concernant les problèmes méthodologiques liés à l'absence de contrôle des fenêtres temporelles chez Zago et al. (2004).

Pris ensembles, ces deux résultats, obtenus dans le même paradigme expérimental que les études de Zago et al. (2004, 2005) et Zago et Lacquaniti (2005a) permettent de rejeter l'hypothèse de l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité dans nos actions d'interception directe.

Discussion générale

Discussion générale

5.1 Résumé des résultats expérimentaux

Le but de ce travail était d'identifier l'influence de la gravité sur la perception et l'interception d'objets en mouvement, et plus particulièrement d'étudier si celle-ci est internalisée et utilisée sur un mode quantitatif et prédictif. Pour cela, nous avons utilisé trois paradigmes expérimentaux, celui des tâches de jugement, celui des interceptions indirectes et enfin celui des interceptions directes.

Les résultats obtenus dans les deux tâches de **jugement perceptif** ont tout d'abord montré que si différentes forces physiques dont la gravité étaient prises en compte pour juger la distance de déplacement autonome d'un objet dans une tâche de perception de la causalité ou estimer le réalisme d'une simulation, cette utilisation se faisait d'une manière qualitative et non quantitative. Ainsi, dans la tâche de perception de la causalité où les participants devaient estimer le rayon d'action du lanceur sur un objet mis en mouvement par le choc, les résultats ont montré que toutes les informations disponibles pour estimer les effets des différentes forces de la physique, comme par exemple la consigne de distance à la scène virtuelle, n'étaient pas utilisées. De plus, la modélisation des résultats a montré que les réponses des participants correspondaient à une approximation des lois de la physique, réalisée en appliquant à la scène visuelle les différentes forces (gravité et friction) sans pour autant calculer précisément leur effet. En d'autres termes, les participants n'ont utilisé la gravité que partiellement et d'une manière incompatible avec l'hypothèse d'un modèle interne quantitatif.

La deuxième expérience perceptive a montré que l'accélération gravitaire était perçue plus précisément lorsque les participants agissaient que lorsqu'ils observaient. Ces résultats, conformes à l'utilisation d'un modèle direct comme le modèle MOSAIC (Wolpert et al., 2001) ou d'émulation (Grush, 2004), ou des modèles écologiques et aux lois de contrôle (Warren, 1988), est en contradiction avec l'utilisation d'un modèle interne de la gravité, avec

lequel l'estimation de la gravité devrait être précise et indépendante de la tâche à accomplir, action ou perception.

Les résultats obtenus dans les tâches d'**interception indirecte** sont plus contrastés. S'ils ont permis dans l'expérience 3 de montrer qu'à fenêtre temporelle égale les participants obtenaient les mêmes résultats lorsque la balle chutait à 1g qu'à 0g, ces résultats soulèvent d'autres interrogations et ne permettent pas véritablement de trancher en faveur de l'une ou l'autre des hypothèses formulées.

Premièrement, l'hypothèse d'une utilisation d'une information de premier ordre permettant de spécifier TTC1 (e.g., Lee et al., 1983) n'a pas été confirmée. Dans cette tâche d'interception indirecte, l'utilisation de TTC1 aurait dû se traduire par des réponses précises d'emblée pour la trajectoire à 0g et des erreurs positives pour les trajectoires à 1g (Benguigui et al., 2003). Cela n'a pas été le cas. Dans les expériences de Benguigui al. (2003), les trajectoires utilisées étaient horizontales et les multiples accélérations et décélérations étaient présentées dans des ordres aléatoires. Ces deux différences peuvent expliquer la divergence des résultats.

Néanmoins, ces résultats ne valident pas pour autant l'hypothèse de l'utilisation de TTCg. Ainsi, l'utilisation d'un modèle interne de la gravité aurait dû mener à de bons résultats lorsque la balle accélère à 1g mais à des erreurs négatives lorsque la balle chute à 0g, du fait d'une anticipation erronée d'une accélération de la balle. Ces résultats ne sont pas non plus ceux observés. En partant de ce constat, nous avons proposé une interprétation alternative.

Il est en effet possible que dans cette tâche les participants aient initié leur geste pour une information de distance. Les résultats de l'expérience 5 vont d'ailleurs dans ce sens, en montrant que des indices spatiaux ont favorisé la précision des réponses, par une tendance

(effet proche d'être significatif) à améliorer l'erreur temporelle commise et par un taux d'interception significativement plus élevé.

Pris ensembles, les résultats de l'expérience 3 et 5 confirmeraient ainsi l'hypothèse de Caljouw et al. (2004b & c) énonçant que l'utilisation de TTC n'est pas toujours indispensable dans le timing des actions d'interception.

Néanmoins, les résultats de l'expérience 4 reposant sur la présence d'essais pièges n'ont pas vraiment confirmé cette interprétation. En effet, seuls deux participants ont eu des résultats compatibles avec l'utilisation d'une information de distance. Par ailleurs, quatre participants ont obtenu des résultats compatibles avec l'utilisation de TTCg tandis que trois autres avaient des résultats compatibles avec TTC1.

Au final, les résultats des trois expériences d'interception indirecte ont donc plutôt confirmé qu'une pluralité d'informations pouvait être utilisée. Ces différentes informations seraient sélectionnées sur la base des contraintes de la tâche (e.g., trajectoires horizontales ou verticales ; trajectoires répétées ou au contraire variées), de l'acteur (e.g., âge, expérience, etc.) et de l'environnement (e.g., présence d'indices spatiaux dans l'environnement).

Enfin, les résultats des expériences d'**interception directe** ont révélé deux choses. Premièrement, les résultats de l'expérience 6 ont montré que la masse d'un objet et donc la résistance de l'air n'étaient pas prises en compte dans le timing de l'action. Ceci est un premier élément en défaveur de l'utilisation du modèle interne de la gravité puisque le corollaire de cette hypothèse est un timing de l'action sur un mode prédictif. Cependant, puisque la résistance de l'air n'est pas prise en compte, l'utilisation du modèle interne de la gravité aurait du conduire les participants à produire leur mouvement sur la base d'une accélération constante de 9.81 m/s^2, alors que l'accélération réelle devient de plus en plus faible au cours de la chute et en conséquence, l'intercepteur aurait dû arriver en avance au point d'interception. Les résultats obtenus contredisent clairement cette hypothèse, et

montrent un pattern d'erreur compatible avec l'utilisation de TTC1. En effet, l'erreur initiale reflète l'utilisation de TTC1 tandis que l'EC n'est pas systématiquement négative (erreur en avance) comme prédit par l'utilisation d'un modèle interne de la gravité sans prise en compte de la résistance de l'air.

Deuxièmement, les résultats de l'expérience 7 ont confirmé notre interprétation des résultats de Zago et al. (2004) concernant un problème méthodologique dans le contrôle des fenêtres temporelles d'interception plutôt que des représentations différentes menant à l'utilisation d'un modèle 1g dans le cas d'une interception d'une balle réelle et d'un modèle 0g dans le cas d'une interception d'une balle virtuelle. En effet, le seul résultat en faveur de l'hypothèse de Zago et al. (2004) se situe au niveau de la vitesse d'exécution du geste, les participants adoptant une vitesse légèrement plus faible lorsqu'ils interceptent une balle virtuelle que lorsqu'ils interceptent une balle réelle. En revanche, les autres variables dépendantes (MI, EC, EA, $TI_{Feedback}$, $TI_{Contact}$ et EI) contredisent l'utilisation d'un modèle interne de la gravité en montrant une absence de différence dans l'interception d'un objet réel ou virtuel.

Les résultats des chapitres 3 et 4 révèlent des erreurs relativement importantes dans les tout premiers essais alors que dans la vie courante, on est souvent amené à attraper des objets en chute libre avec une bonne efficacité dès le premier essai. Cela provient sans doute du fait que dans la plupart des actions que l'on rencontre dans la vie quotidienne, les contraintes de précision sont relativement faibles. Il s'agit de capture où il est possible d'arriver bien en avance et d'attendre la balle avec un timing de fermeture de la main relativement peu contraignant. Dans les tâches que nous avons utilisées dans les chapitres 3 et 4, il s'agissait de tâche de frappe avec des fenêtres temporelles extrêmement réduites et proches de celles décrites comme les plus contraignantes notamment par Regan (1997). Dans ces conditions, il apparaît donc nécessaire d'avoir quelques essais pour trouver le bon timing. Cette adaptation

pourrait correspondre à la notion de calibration développée par Jacobs & Michaels (2006) dans le cadre de l'approche écologique.

De ce point de vue, Jacobs et Michaels (2006) définissent la calibration comme le processus par lequel la relation univoque entre l'information et le mouvement peut être ajustée aux besoins spécifiques de la tâche et de l'interaction entre celui qui agit et l'environnement. Par exemple, si la perception d'un évènement peut être représentée par une fonction linéaire de la forme :

$$J = aO + b, \tag{13}$$

où J est le jugement d'un évènement (e.g., quand initier un mouvement d'interception), O la variable informative et a et b des paramètres de la fonction, alors le processus de calibration correspond à un changement dans les paramètres a et b. Ce processus de calibration pourrait permettre par exemple de prendre en compte le délai visuo-moteur dans les actions d'interception (Benguigui & Baurès, soumis). Ainsi, le délai qui existe entre la stimulation rétinienne et l'utilisation de l'information au niveau du geste, qui est généralement estimé entre 100 et 200 ms dans les actions d'interception selon les contraintes informationnelle et motrice de la tâche (Le Runigo et al., 2005), doit nécessairement être compensé (Nijhawan, sous presse) et le processus de calibration pourrait permettre cette prise en compte (Benguigui et Baurès, soumis).

Un autre exemple davantage lié à nos résultats peut être proposé. Pour une information donnant accès à TTC1 qui ne permettrait pas d'intercepter correctement un objet accélérant dans une tâche d'interception indirecte, une recalibration de la relation information-mouvement en fonction des contraintes de la tâche pourrait permettre l'interception, en modifiant par exemple la valeur de TTC1 utilisée pour initier le mouvement. Ainsi, dans le cas d'une balle accélérée, la valeur de TTC1 surestime le TTC réel. Une valeur du coefficient directeur « a » de l'équation 13 comprise entre 0 et 1 permettrait de compenser cette

surestimation. L'observation d'une erreur initiale positive suivie d'une erreur au deuxième essai systématiquement négative (comme cela est le cas pour les expériences du chapitre 3, voir figures 30 et 33) pourrait indiquer ce processus de calibration, la recherche des bonnes valeurs des paramètres « a » et « b » permettant d'ajuster la valeur de TTC1 pour laquelle le mouvement de l'effecteur doit être initié.

Concernant le rôle de la gravité, on ne peut nier d'après les résultats obtenus dans les trois chapitres expérimentaux que la gravité puisse influencer la perception et le timing des actions d'interception. Néanmoins, plutôt que de parler de *modèle interne* dans le cas de la balle virtuelle, nous préférons utiliser le terme de *connaissance a priori*. Plutôt qu'internalisée au plan quantitatif, il semble donc que la gravité puisse être prise en compte d'une manière qualitative, selon un raisonnement du type « si l'objet se déplace dans le sens de la gravité après avoir été percuté par un autre objet, alors il s'arrêtera plus tard que s'il se déplace dans le sens contraire de la gravité » dans une tâche de jugement ou bien dans une tâche d'interception « une balle en chute libre accélère, je dois donc initier mon geste plus tôt ou le faire plus vite ». Dans ce cas d'ailleurs on peut envisager que cette connaissance puisse permettre une modulation de la calibration a priori permettant dans certains cas d'être mieux préparé pour agir. Le rôle de la gravité peut ainsi être replacé dans un contexte plus général abordé dans la section suivante.

5.2 Autres effets de la gravité et de différentes constantes environnementales

La gravité est une constante environnementale composée de deux facteurs : sa valeur propre (9.81 m/s²) et son vecteur propre (vertical dirigé vers le bas). Bien qu'étant une constante majeure dans notre environnement, nous avons montré ici que la valeur propre de la gravité n'est pas internalisée de manière quantitative dans les actions d'interception ou de jugement. Ce résultat, confirmé dans trois paradigmes différents, est cohérent avec d'autres

montrant qu'un grand nombre d'autres contraintes ne sont pas non plus internalisées. En effet, il existe d'autres invariants sur Terre qui, bien que présentant un intérêt potentiel à être internalisés ou incorporés aussi bien par les êtres humains que par les animaux, ne l'ont pas été.

Dans le monde animal par exemple, et dans une tâche éminemment plus vitale que les actions sportives étudiées dans cette étude, les poissons archers propulsent des jets d'eau avec leur bouche pour atteindre des proies afin de les faire tomber dans l'eau et de s'en nourrir. Durant ce tir, la bouche du poisson est au-dessus du niveau de l'eau mais ses yeux restent sous l'eau. Ceci nécessite une adaptation visuelle pour compenser le décalage entre l'image de la cible et la position réelle de la cible, dû à la réfraction de la lumière à la surface de l'eau. En effet, la réfraction a pour conséquence que l'image virtuelle de la cible est au dessus de la cible réelle. Néanmoins, deux études menées par Timmermans et Vossen (2000) et Timmermans (2001) sont arrivées à la conclusion que le poisson archer n'utilise ni feedback ni correction intégrée de l'image visuelle pour toucher la cible. En d'autres termes, les poissons archers n'apprennent pas les principes optiques de déviation de la lumière par la surface de l'eau. Il semble plutôt qu'ils développent une visée efficace pour une certaine gamme d'angles, et qu'une fois celle-ci développée, elle soit notamment résistante à la privation de pratique.

D'autres études se sont intéressées à l'internalisation du vecteur propre de la gravité. Par exemple, Hecht et Proffitt (1995) ont montré que la représentation du niveau de l'eau, autre invariant physique résultant du vecteur propre de la gravité, n'est pas internalisée. Lorsque l'eau est calme, son niveau est toujours horizontal. Pourtant, lorsqu'on demande à des individus de dessiner la surface de l'eau dans un verre qui est incliné, 40% des individus dessinent ce niveau avec une inclinaison supérieure de 5° de l'horizontale (Figure 43).

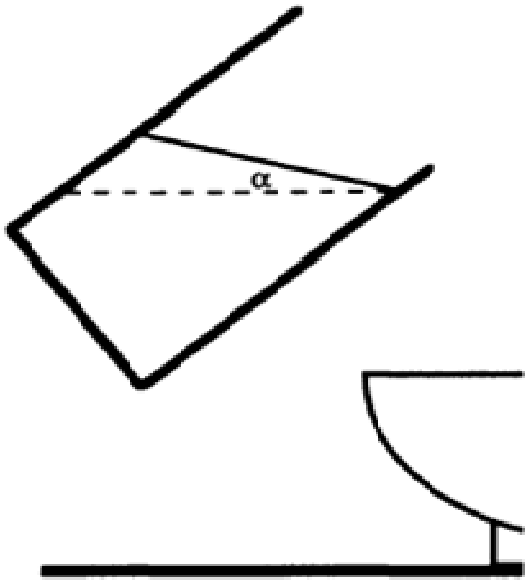


Figure 43 : Ecart donné par des individus estimant l'horizontalité du niveau de l'eau, d'après Hecht (2001). L'angle α est plus grand de 5° de l'horizontale chez 40% des individus.

De plus, des participants expérimentés tels que des serveurs présentent des déviations plus importantes que la population moyenne. Une plus grande expérience qui pourrait avoir comme conséquence de favoriser l'internalisation d'une représentation exacte induit au contraire une représentation plus erronée encore qui n'empêche pas d'ailleurs les serveurs expérimentés d'agir avec plus d'efficacité pour éviter que les verres qu'ils servent ne débordent pas.

D'autres lois de la physique ne sont pas non plus internalisées. Les études menées par Kaiser (Kaiser, Proffitt & McCloskey, 1985 ; Kaiser, Jonides & Alexander, 1986) montrent qu'une grande partie de la population a une mauvaise conception des lois fondamentales du mouvement. Dans leurs études, Kaiser et al. montrent que de nombreux individus méconnaissent le modèle Newtonien qui énonce qu'en l'absence de forces externes, les objets gardent une trajectoire droite, et agissent comme si, en l'absence de forces externes, les objets gardent la même forme que lors de leur trajectoire initiale (Figure 44). Ainsi, malgré leur permanence, de nombreux invariants physiques ne sont pas internalisés.

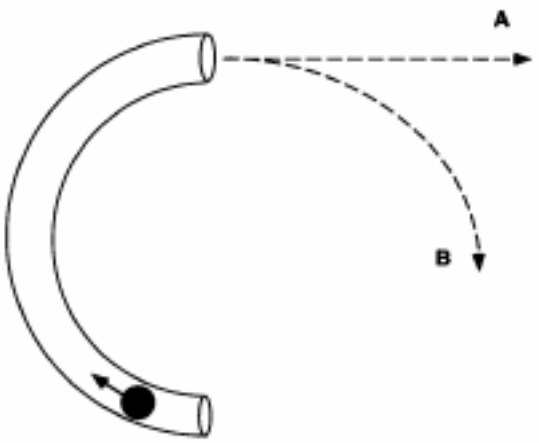


Figure 44 : Problème du tube en C. Le dispositif est vu du dessus. Une grande partie des individus répondent incorrectement (ligne en pointillée B) lorsqu'on leur demande de dessiner la trajectoire de la balle à la sortie du tube. La ligne pointillée A représente la trajectoire correcte de la balle à la sortie du tube, repris chez Hecht (2001) d'après Kaiser, Jonides et Alexander (1986).

L'internalisation de la gravité et son utilisation ont beaucoup été étudiées dans de nombreuses tâches autres que les actions d'interception, donnant lieux à des résultats différents selon la tâche étudiée. Ainsi, la gravité ne semble pas être internalisée dans la construction des cadres de références (McIntyre, Lipshits, Zaoui, Berthoz, & Gurfinkel, 2001b) et n'influence pas le phénomène d'asymétrie dans la perception des axes de référence (Lipshits, McIntyre, Zaoui, Gurfinkel, & Berthoz, 2001). Enfin, confirmant ces deux résultats précédents, Lipshits, Bengoetxea, Cheron et McIntyre (2005) ont montré que la perception de la direction de la gravité n'est pas nécessaire à l'apparition de l' « effet oblique », consistant à donner des réponses plus rapides et moins variables lorsque les participants doivent ajuster une ligne avec une position de référence montrée précédemment si la position de référence était horizontale ou verticale plutôt qu'oblique. Par contre, si la gravité est bien utilisée pour contrôler le mouvement des yeux lorsqu'ils se déplacent pour compenser les mouvements de la tête, afin de garder une stabilité rétinienne, ce mouvement se fait selon Barnett-Cowan, Dyde et Harris (2005) grâce à la détection de la gravité, perçue via les capteurs vestibulaires, plutôt que par une internalisation de la gravité.

En revanche, certains résultats montrent que la gravité est prise en compte dans certaines tâches par le système nerveux central, notamment dans l'ajustement de la pression de la main exercée pour soulever un objet. Lorsqu'un objet est tenu entre les doigts, la force perpendiculaire appliquée par les doigts sur la surface de contact (force de saisie) doit être suffisante pour annuler les composantes gravitationnelle et inertielle de la force tangentielle (force de charge) s'appliquant sur les doigts. Trop faible, la force appliquée par les doigts ne permettrait pas de tenir l'objet et celui-ci chuterait. Trop forte, la force appliquée par les doigts pourrait endommager l'objet. L'être humain applique donc toujours une force de saisie légèrement supérieure à la force minimum pour empêcher l'objet de glisser. Néanmoins, la force tangentielle s'appliquant sur l'objet varie avec les mouvements du bras. Il a été montré que les êtres humains sont capables de moduler de manière anticipée leur force de saisie pour contrer une augmentation de la force de charge lorsque le bras se déplace, et cela a été interprété comme une preuve de l'internalisation par le système nerveux central des propriétés dynamiques du bras, de l'objet soulevé (texture et masse) ainsi que de l'environnement (gravité) permettant de prédire la force de charge et d'ajuster en anticipation la force de saisie (Augurelle, Penta, White & Thonnard, 2003 ; White, McIntyre, Augurelle & Thonnard, 2005).

Utilisant une tâche de pointage, Papaxanthis, Pozzo, Popov & McIntyre (1998) ainsi que Papaxanthis, Pozzo et McIntyre (2005) arrivent eux aussi à la conclusion d'une internalisation de la gravité prise en compte dans la génération de la commande motrice, en observant que les profils de vitesse dans un mouvement de pointage sont différents si le mouvement se fait vers le haut ou vers le bas, et ceci même en l'absence de gravité. Selon les auteurs, cette observation indique que le système nerveux central utilise un modèle interne de la gravité plutôt qu'une détection de la présence de la gravité via les senseurs vestibulaires. En

microgravité, il apparaît donc que le système nerveux central fait confiance à des indices cognitifs d'ordre élevé, comme l'orientation de l'environnement visuel, pour déterminer le haut et le bas, et produire de manière appropriée le mouvement du bras en fonction d'une gravité internalisée.

Enfin, la gravité améliore la perception de notre axe z (axe passant par notre tête et nos pieds), comme le montre l'étude de Carriot et al. (2004). Les résultats obtenus dans une tâche où les participants devaient indiquer avec leur bras l'horizontal en vol parabolique montrent une dégradation des performances et une modification des paramètres cinématiques chez des sujets novices entre une condition 1g et 0g. En revanche, les performances ne sont pas différentes entre deux conditions 1g et 0g avec pression au niveau des pieds, ce qui démontre selon les auteurs que le modèle interne de la gravité permettant une meilleure estimation de l'axe z nécessaire à la tâche est activé lorsqu'une pression sous les pieds est ressentie.

Certains invariants environnementaux pourraient donc avoir été intégrés et détermineraient pour une part notre perception du monde. Un de ces invariants, la gravité, pourrait jouer ce rôle dans certaines situations et pour certaines tâches. Cette intégration pourrait finalement se manifester différemment ou ne pas se manifester en fonction des tâches à effectuer et même des différentes conditions d'exécution d'une même tâche. Concernant les tâches perceptives et d'interception que nous avons utilisées, nous avons montré que seule une connaissance partielle et qualitative des effets de la gravité en termes de valeur propre pourrait être utilisée, permettant une modulation du jugement ou de l'action mais ne permettant pas de prédiction quantitative précise pour réaliser la tâche.

5.3 Perspectives

Le défi pour les recherches futures sera notamment de montrer plus nettement encore dans quels cas et comment une connaissance implicite et qualitative de la physique affecte le timing des actions d'interception, particulièrement en identifiant les paramètres de mouvement qui sont modifiés (e.g., moment d'initiation, vitesse de mouvement). Cette recherche pourrait donner une occasion d'examiner comment des variables optiques employées pour initier ou guider les actions d'interception peuvent être modulées par une connaissance a priori des lois de physique. Plusieurs expériences pourraient aider à répondre à cette question.

Tout d'abord, une expérience de jugement d'arrivée dans laquelle les participants devraient estimer le TTC d'un mobile sur une cible, après occultation de la partie finale de la trajectoire, pourrait être réalisée (e.g., DeLucia & Liddell, 1998 ; Benguigui et al., sous presse). Cette tâche qui se rapproche des tâches d'interception indirecte dans la mesure où l'utilisation d'information est impossible dans les instants qui précèdent le contact, permettrait d'avoir différents temps d'occultation (différents temps pendant lequel l'utilisation de l'information n'est plus possible) alors que les tâches d'interception indirecte nécessitent un temps d'interception fixe ayant été intégré par les participants. Ceci permettrait, en utilisant des essais pièges comme dans l'expérience 4, d'avoir des prédictions d'erreurs plus discriminantes notamment entre TTC1 et TTCg. Par ailleurs, la comparaison de résultats obtenus avec des trajectoires ayant une accélération de 0g ou 1g, horizontales ou verticales permettraient de vérifier si la direction de la trajectoire permet d'utiliser une connaissance des effets de la gravité.

Il serait aussi très intéressant d'étudier les interceptions d'objets aux trajectoires décélérées. En effet, si la gravité accélère tout objet se déplaçant vers le bas, elle décélère aussi tout objet se déplaçant vers le haut. Cette expérience pourrait se faire dans une tâche

d'interception directe d'un objet décélérant sur une trajectoire verticale de bas en haut ou de haut en bas.

Une autre expérience pourrait reposer sur une tâche plus complexe et plus naturelle que ce qui se fait habituellement. En effet, les tâches généralement proposées pour étudier le modèle interne de la gravité se limitent à une balle (réelle ou virtuelle) en chute, et une interception réduite à un mouvement du bras, voir une pression sur un bouton. Il serait intéressant de dépasser ces stimuli relativement limités, et ce mouvement d'interception ne sollicitant que peu de degrés de liberté. Cela permettrait notamment de répondre aux critiques souvent justifiées sur la différence entre les tâches quotidiennes d'interception et les tâches de laboratoire, dans lesquelles le stimulus est nécessairement appauvri pour être expérimentalement contrôlé. L'utilisation d'une tâche dans laquelle les participants doivent estimer en même temps deux TTCs, peu courante en laboratoire (e.g., DeLucia & Novak, 1997 ; DeLucia & Meyer, 1999), mais plutôt fréquente en situations sportives pourrait révéler d'autres sources d'information, tout comme la conduite d'une expérience dans laquelle les participants devraient réaliser des déplacements locomoteurs pour intercepter la balle (e.g., Chardenon, Montagne, Buekers & Laurent, 2002 ; Chardenon, Montagne, Laurent & Bootsma, 2005 ; Bastin, Craig & Montagne, 2006).

Enfin, une dernière expérience étudierait l'importance des informations visuelles au tennis de table. Au service, le joueur est réglementairement tenu d'envoyer la balle au minimum 16 cm au dessus de sa main qui propulse la balle, et il arrive aussi que la balle soit lancée plus d'un mètre au-dessus de la zone de frappe. Les joueurs experts, pour avoir réalisé un nombre très important de services, pourraient avoir appris les effets combinés de la gravité et de la résistance de l'air pour déterminer le TTC de la balle une fois que celle-ci atteint le sommet de sa trajectoire. Si cette hypothèse est vraie, les joueurs n'auraient plus besoin d'informations visuelles sur la chute de la balle pour déterminer son TTC, ce qui leur

permettrait de prélever d'autres informations visuelles sur le jeu, pour servir par exemple à un endroit mettant en difficulté leur adversaire. La réalisation d'une expérience dans laquelle la trajectoire de la balle serait masquée aux participants à un temps déterminé devrait nous permettre de déterminer si les joueurs de tennis de table experts ont appris le TTC d'une balle au service et sont capables de se passer d'informations visuelles sur la balle.

Ces expériences associées sans doute à d'autres qui viendront les compléter permettront d'examiner plus précisément le rôle de notre connaissance implicite et qualitative de la gravité dans les actions d'interception. Le corollaire de cette conclusion est que les travaux menés durant cette thèse n'apportent pas de réponse définitive à la question posée, mais donnent seulement quelques pistes de recherche pour les travaux futurs. Le travail dans le domaine des actions d'interception ne manque donc pas.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

A

Angelaki, D. E., Shaikh, A. G., Green, A. M., & Dickman, J. D. (2004). Neurons compute internal models of the physical laws of motion. *Nature, 430*, 560-564.

Augurelle, A. S., Penta, M., White, O., & Thonnard, J. L. (2003). The effects of a change in gravity on the dynamics of prehension. *Experimental Brain Research, 148*, 533-540.

B

Babler, T. G., & Dannemiller, J. L. (1993). Role of image acceleration in judging landing location of free-falling projectiles. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 19*, 15-31.

Barnett-Cowan, M., Dyde, R. T., & Harris, L. R. (2005). Is an internal model of head orientation necessary for oculomotor control? *Annals New York Academy of Sciences, 1039*, 314-324.

Bastin, J., & Montagne, G. (2005). The perceptual support of goal-directed displacement is context-dependent. *Neuroscience Letters, 376*, 121-126.

Bastin, J., Craig, C., & Montagne, G. (2006). Prospective strategies underlie the control of interceptive actions. *Human Movement Science, 25*, 718-732.

Baurès, R., Benguigui, N., Amorim, M.-A., & Siegler, I. A. (2007). Intercepting free falling objects: better use Occam's razor than internalize Newton's law. *Vision Research, 47*, 2982-2991.

Benguigui, N., Ripoll, H., & Broderick, M. P. (2003). Time-to-contact estimation of accelerated stimuli is based on first-order information. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29*, 1083-1101.

Benguigui, N., Broderick, M. P., & Ripoll, H. (2004). Age differences in estimating arrival-time. *Neuroscience Letters, 369*, 197-202.

Références bibliographiques

Benguigui, N., Broderick, M. P., Baurès, R., & Amorim, M. A. (sous presse). Motion prediction and the velocity effect in children. *British Journal of Developmental Psychology*.

Benguigui, N., & Baurès, R. (soumis). Visuomotor delay in interceptive actions. *Behavioral and Brain Sciences.*

Bennett, S., van der Kamp, J., Savelsbergh, G. J., & Davids, K. (1999). Timing a one-handed catch. I. Effects of telestereoscopic viewing. *Experimental Brain Research, 129*, 362-368.

Bennett, S. J., van der Kamp, J., Savelsbergh, G. J., & Davids, K. (2000). Discriminating the role of binocular information in the timing of a one-handed catch. The effects of telestereoscopic viewing and ball size. *Experimental Brain Research, 135*, 341-347.

Bhalla, M., & Proffitt, D. R. (1999). Visual-motor recalibration in geographical slant perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 25*, 1076-1096.

Bootsma, R. J., & Van Wieringen, C. W. (1990). Timing an attacking forehand drive in table tennis. *Journal of experimental psychology: human perception and performance, 16*, 21-29.

Bootsma, R. J., & Oudejans, R. R. (1993). Visual information about time-to-collision between two objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 19*, 1041-1052.

Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (1996). Hitting moving targets: co-operative control of 'when' and 'where'. *Human Movement Science, 15*, 39-53.

Brenner, E., Smeets, J. B. J., & de Lussanet, M. H. E. (1998). Hitting moving targets: continuous control of the acceleration of the hand on the basis of the target's velocity. *Experimental Brain Research, 122*, 467-474.

Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2005). Intercepting moving targets: why the hand's path depends on the target's velocity. In B.E. Rogowitz, T.N. Pappas & S.J. Daly (Eds.), *Human Vision and Electronic Imaging X*, vol. 5666 (pp. 374-384).

Brouwer, A.-M., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2000). Hitting moving objects: The dependency of hand velocity on the speed of the target. *Experimental Brain Research*, *133*, 242-248.

Brouwer, A.-M., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2002a). Hitting moving objects: Is target speed used in guiding the hand? *Experimental Brain Research*, *143*, 198-211.

Brouwer, A.-M., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2002b). Perception of acceleration with short presentation times: Can acceleration be used in interception? *Perception & Psychophysics, 64*, 1160-1168.

C

Calderone, J. B., & Kaiser, M. K. (1989). Visual acceleration detection: Effect of sign and motion orientation. *Perception & Psychophysics, 45*, 391-394.

Caljouw, S. R., van der Kamp, J., & Savelsbergh, G. J. (2004a). Timing of goal-directed hitting: impact requirements change the information-movement coupling. *Experimental Brain Research, 155*, 135-144.

Caljouw, S. R., van der Kamp, J., & Savelsbergh, G. J. (2004b). Catching optical information for the regulation of timing. *Experimental Brain Research, 155,* 427-438.

Caljouw, S. R., van der Kamp, J. & Savelsbergh, G. J. P. (2004c). The Fallacious Assumption of Time-to-Contact Perception in the Regulation of catching and Hitting, In: H. Hecht & G.J.P. Savelsbergh (Eds.), *Time-to-Contact*. (pp. 443-474). Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science Publishers.

Carnahan, H., & MacFadyen, B. J. (1996). Visuomotor control when reaching toward and grasping moving targets. *Acta Psychologica, 92*, 17-32.

Références bibliographiques

Carriot, J., Bringoux, L., Charles, C., Mars, F., Nougier, V. & Cian, C. (2004). Perceived Body Orientation in Microgravity : Effects of Prior Experience and Pressure Under the Feet. *Aviation, Space and Environmental Medicine, 75*, 795-799.

Chardenon, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002). The visual control of ball interception during human locomotion. *Neuroscience Letters, 334*, 13-16.

Chambers, F., Page, B., & Zaidins, C. (2003). Atmosphere, weather, and baseball: How much farther do baseballs really fly at Denver's Coors Field? *The Professional Geographer, 55*, 491-504.

Champagne, A.B., Klopfer, L.E., Anderson, J.H. (1980). Factors influencing the learning of classical mechanics. *American Journal of Physics, 48*, 1074-1079.

Chardenon, A., Montagne, G., Buekers, M. J., & Laurent, M. (2002). The visual control of ball interception during human locomotion. *Neuroscience Letters, 334*, 13-16.

Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M., & Bootsma, R. J. (2004). The perceptual control of goal-directed locomotion: a common control architecture for interception and navigation? *Experimental Brain Research, 158*, 100-108.

Chardenon, A., Montagne, G., Laurent, M., & Bootsma, R. J. (2005). A Robust Solution for Dealing With Environmental Changes in Intercepting Moving Balls. *Journal of Motor Bahavior, 37*, 52-64.

Clément, A., & Droit-Volet, S. (2006). Counting in a time discrimination task in children and adults. *Behavioural Processes, 71*, 164-171.

Clement, G., Vieville, T., Lestienne, F., Berthoz, A. (1986). Modifications of gain asymmetry and beating field of vertical optokinetic nystagmus in microgravity. *Neuroscience Letters, 63*, 271-274.

Collewijn, H., & Erkelens, C. J. (1990). Binocular eye movements and the perception of depth. In E. Kowler (Ed.), *Eye movements and their role in visual and cognitive processes* (pp. 213-261). Amsterdam: Elsevier.

Craig, C. M., Berton, E., Rao, G., Fernandez, L., & Bootsma, R. J. (2006). Judging where a ball will go: the case of curved free kicks in football. *Naturwissenschaften, 93*, 97-101.

Creem-Regehr, S. H., Gooch, A. A., Sahm, C. S., & Thompson, W. B. (2004). Perceiving virtual geographical slant: action influences perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 30*, 811-821.

Cunningham, D. W., Billock, V. A., & Tsou, B. H. (2001). Sensorimotor adaptation to violations of temporal contiguity. *Psychological Science, 12*, 532–535.

D

Daum, M. M., Huber, S., & Krist, H. (2007). Controlling reaching movements with predictable and unpredictable target motion in 10-year-old children and adults. *Experimental Brain Research, 177*, 483-492.

Davidson, P. R., & Wolpert, D. M. (2003). Motor learning and prediction in a variable environment. *Current Opinion in Neurobiology, 13*, 232-237.

Davidson, P. R. & Wolpert, D. M. (2005). Widespread access to predictive models in the motor system: a short review. *Journal of Neural Engineering, 2*, 313-319.

de Lussanet, M. H., Smeets, J. B., & Brenner, E. (2001). The effect of expectations on hitting moving targets: influence of the preceding target's speed. *Experimental Brain Research, 137*, 246-248.

de Lussanet, M. H., Smeets, J. B., & Brenner, E. (2002). The relation between task history and movement strategy. *Behavioural Brain Research, 129*, 51-59.

DeLucia, P. R., & Novak, J. B. (1997). Judgments of relative time-to-contact of more than two approaching objects: toward a method. *Perception & Psychophysics, 59*, 913-928.

Références bibliographiques

DeLucia, P. R., & Liddell, G. W. (1998). Cognitive Motion Extrapolation and Cognitive Clocking in Prediction Motion Tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 24*, 901-914.

DeLucia, P. R., & Meyer, L. E. (1999). Judgements About the Time-to-Contact Between Two Objects During Simulated Self-Motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 25*, 1813-1833.

DeLucia, P. R., Kaiser, M., Bush, J., Meyer, L., & Sweet, B. (2003). Information integration in judgements of time to contact. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology, 56(A)*, 1165-1189.

DeLucia, P. R. (2004a). Multiple sources of information influence time-to-contact judgments: Do heuristics accommodate limits in sensory and cognitive processes? In H. Hecht & G.J.P. Savelsbergh (Eds.), *Time-to-contact*. (pp. 243-286). Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science Publishers.

DeLucia, P. R. (2004b). Time-to-contact judgments of an approaching object that is partially concealed by an occluder. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 30*, 287-304.

Dessing, J. C., Bullock, D., Peper, C. L., & Beek, P. J. (2002). Prospective control of manual interceptive actions: comparative simulations of extant and new model constructs. *Neural Networks, 15*, 163-179.

Dubrowski, A., & Carnahan, H. (2000). Task dependent processing of visual information about target acceleration. *Brain and Cognition, 43*, 172-177.

Dubrowski, A., & Carnahan, H. (2002). Action-perception dissociation in response to target acceleration. *Vision Research, 42*, 1465-1473.

F

Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1984). Representational Momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 10*, 126-132.

G

Georgopoulos, A. (2004). Catching for Real and Catching for Fun in Ecological Psychology. Focus on "Internal Models of Target Motion: Expected Dynamics Overrides Measured Kinematics in Timing Manual Interceptions". *Journal of Neurophysiology, 91*, 1455.

Gibson, J.J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston, MA: Houghton Mifflin.

Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston, MA: Houghton Mifflin.

Gilden, D.L. (1991). On the origins of dynamical awareness. *Psychological Review*, *98*, 554-568.

Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences, 15*, 20-25.

Goodale, M. A., & Westwood, D. A. (2004). An evolving view of duplex vision: separate but interacting cortical pathways for perception and action. *Current Opinion in Neurobiology, 14*, 203-211.

Goodale, M. A., Kroliczak, G., & Westwood, D. A. (2005). Dual routes to action: contributions of the dorsal and ventral streams to adaptive behavior. *Progress in Brain Research, 149*, 269-283.

Graf, W., De Waele, C., Vidal, P.P. (1995). Functional anatomy of the head-neck movement system of quadrupedal and bipedal mammals. *Journal of Anatomy, 186*, 55-74.

Gray, R., & Regan, D. (1998). Accuracy of estimating time to collision using binocular and monocular information. *Vision Research, 38*, 499-512.

Gray, R. (2002). Behavior of college baseball players in a virtual batting task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 28*, 1131-1148.

Grush, R. (2004). The emulation theory of representation: Motor control, imagery, and perception. *Behavioral and Brain Sciences, 27*, 377-442.

H

Hayhoe, M., Mennie, N., Sullivan, B. & Gorgos, K. (2005). The role of internal models and prediction in catching balls. *Proceedings of AAAI Fall Symposium Series.* (http://www.bcs.rochester.edu/people/mary/HayhoeM.pdf)

Hecht, H., & Proffitt, D. R. (1995). The Price of Expertise: Effects of Experience on the Water-Level Task. *Psychological Science, 6*, 90-95.

Hecht, H., Kaiser, M. K., & Banks, M. S. (1996). Gravitational acceleration as a cue for absolute size and distance? *Perception & Psychophysics, 58*, 1066-1075.

Hecht, H., & Bertamini, M. (2000). Understanding projectile acceleration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 26*, 730-746.

Hecht, H. (2001). Regularities of the physical world and the absence of their internalization. *Behavioral and Brain Sciences, 24*, 608-617.

Hecht, H., Vogt, S., & Prinz, W. (2001). Motor learning enhances perceptual judgment: a case for action-perception transfer. *Psychological Research, 65*, 3-14.

Heyes, C. M., & Foster, C. L. (2002). Motor learning by observation: evidence from a serial reaction time task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology, 55(A)*, 593-607.

Hubbard, T. L. (1995). Cognitive representation of motion: evidence for friction and gravity analogues. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 21*, 241-254.

Hubbard, T. L. (1999). How consequences of physical principles influence mental representation: the environmental invariants hypothesis. In: P. R. Killeen, & W. R. Uttal (Eds.), *Fechner Day 99: The End of 20th Century Psychophysics. Proceedings of the Fifteenth Annual Meeting of the International Society for Psychophysics*. (pp 274-279). Tempe, AZ, USA: The International Society for Psychophysics.

Hubbard, T. L., Blessum, J. A., & Ruppel, S. E. (2001). Representational Momentum and Michotte's (1946/1963) "Launching Effect" Paradigm. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 27*, 294-301.

Hubbard, T. L., & Ruppel, S. E. (2002). A possible role of naïve impetus in Michotte's "launching effect": Evidence from representational momentum. *Visual cognition, 9*, 153-176.

Hubbard, T. L., & Favretto, A. (2003). Naïve impetus and Michotte's "tool effect": evidence from representational momentum. *Psychological Research, 67*, 134-152.

Hubbard, T. L. (2005). Representational momentum and related displacements in spatial memory: A review of the findings. *Psychonomic Bulletin & Review, 12*, 822-851.

I

Indovina, I., Maffei, V., Bosco, G., Zago, M., Macaluso, E., & Lacquaniti, F. (2005). Representation of visual gravitational motion in the human vestibular cortex. *Science, 308*, 416-419.

J

Jacobs, D. M., Runeson, S., & Michaels, C. F. (2001). Learning to Visually Perceive the Relative Mass of Colliding Balls in Globally and Locally Constrained Task Ecologies. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 27*, 1019-1038.

Jacobs, D. M., & Michaels, C. F. (2006). Lateral interception I: operative optical variables, attunement, and calibration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 32*, 443-458.

K

Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., & McCloskey, M. (1985). The development of beliefs about falling objects. *Perception & Psychophysics, 38,* 533-539.

Kaiser, M. K., Jonides, J., & Alexander, J. (1986). Intuitive reasoning about abstract and familiar physics problems. *Memory and Cognition, 14,* 308-312.

Karniel, A., & Mussa-Ivaldi, F. A. (2002). Does the motor control system use multiple models and context switching to cope with a variable environment? *Experimental Brain Research, 143*, 520-524.

Kerzel, D. (2000). Eye movements and visible persistence explain the mislocalization of the final position of a moving target. *Vision Research, 40*, 3703-3715.

Kerzel, D., Jordan, J. S. & Müsseler, J. (2001). The Role of Perception in the Mislocalization of the Final Position of a Moving Target. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 27*, 829-840

Kerzel, D., & Gegenfurtner, K. R. (2003). Neuronal processing delays are compensated in the sensorimotor branch of the visual system. *Current Biology, 13*, 1975-1978.

Kerzel, D. (2005). Representational Momentum Beyond Internalized Physics. Embodied Mechanisms of Anticipation Cause Errors in Visual Short-Term Memory. *Current Directions in Psychological Science, 14*, 180-184.

Kerzel, D. (2006). Why eye movements and perceptual factors have to be controlled in studies on “representational momentum”. *Psychonomic Bulletin & Review, 13*, 166-173.

Kim, I. K., & Spelke, E. S. (1992). Infants' sensitivity to effects of gravity on visible object motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 18*, 385-393.

Kim, I. K., & Spelke, E. S. (1999). Perception and understanding of effects of gravity and inertia on object motion. *Developmental Science, 2*, 339-362.

Kim, N. G., & Grocki, M. J. (2006). Multiple sources of information and time-to-contact judgements. *Vision Research, 46*, 1946-1958.

Kornilova, L., Grigorova, V., Mueller, C., Sagalovitch, S.V., Alekhina, M., Kozlovskaya, I. (2004). Effects of vestibular and support afferentation upon visual pursuit in microgravity. *Journal of Gravitational Physiology, 11*, 5-7.

Kornilova, L. N. (2004). The role of gravitation-dependent systems in visual tracking. *Neuroscience and Behavioral Physiology, 34*, 773-781.

L

Lacquaniti, F., & Maioli, C. (1989a). The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching. *Journal of Neuroscience, 9*, 134-148.

Lacquaniti, F., & Maioli, C. (1989b). Adaptation to suppression of visual information during catching. *Journal of Neuroscience, 9*, 149-159.

Lacquaniti, F., Carozzo, M., & Borghese, N. (1993). The role of vision in tuning anticipatory motor responses of the limbs. In: A. Berthoz (Ed.), *Multisensory control of movement* (pp. 379-393). Oxford, England: Oxford University Press.

Lacquaniti, F., & Zago, M. (2001a). Internalization of physical laws as revealed by the study of action instead of perception. *Behavioral and Brain Sciences, 24,* 684-685.

Lacquaniti, F., & Zago, M. (2001b). Does sensorimotor contigency theory account for perceptual-motor dissociations ? *Behavioral and Brain Sciences, 24*, 991-992.

Références bibliographiques

Land, M. F., & McLeod, P. (2000). From eye movements to actions: how batsmen hit the ball. *Nature Neuroscience, 3*, 1340-1345.

Le Runigo, C., Benguigui, N., & Bardy, B. G. (2005). Perception-action coupling and expertise in interceptive action. *Human Movement Science, 24*, 429-445.

Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision. *Perception, 5*, 437-459.

Lee, D. N., Young, D. S., Reddish, P. E., Lough, S., & Clayton, T. M. (1983). Visual timing in hitting an accelerating ball. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology, 35(A)*, 333-346.

Lee, D., Port, N. L., & Georgopoulos A. P. (1997). Manual interception of moving targets: II. On-line control of overlapping submovements. *Experimental Brain Research, 116,* 421-433.

Lipshits, M., McIntyre, J., Zaoui, M., Gurfinkel, V., & Berthoz, A. (2001). Does gravity play an essential role in the asymmetrical visual perception of vertical and horizontal line length? *Acta Astronautica, 49*, 123-130.

Lipshits, M., Bengoetxea, A., Cheron, G., & McIntyre, J. (2005). Two reference frames for visual perception in two gravity conditions. *Perception, 34*, 545-555.

Lobjois, R., Benguigui, N., & Bertsch J. (2005). Aging and Tennis Playing in a Coincidence-Timing Task With an Accelerating Object: The Role of Visuomotor Delay. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 76,* 398-406.

Lobjois, R., Benguigui, N., & Bertsch J. (2006). The Effect of Aging and Tennis Playing on Coincidence-Timing Accuracy. *Journal of Aging and Physical Activity, 14*, 75-98.

Lobjois, R., Benguigui, N., Bertsch J., & Broderick, M. P. (sous presse). Collision avoidance behavior as a function of aging and tennis playing. *Experimental Brain Research*.

López-Moliner, J. & Bonnet, C. (2002). Speed of response initiation in a time-to-contact discrimination task reflects the use of η. *Vision Research, 42*, 2419-2430.

López-Moliner, J., Brenner, E., & Smeets, J. B. J. (2007). Effects of texture and shape on perceived time-to-passage: knowing "what" influences judging "when". *Perception & Psychopysics, 69*, 887-894.

M

Mattar, A. A. G., & Gribble, P. L. (2005). Motor Learning by Observing. *Neuron, 46*, 153-160.

McIntyre, J., Berthoz, A., & Lacquaniti, F. (1998). Reference frames and internal models for visuo-manual coordination: What can we learn from microgravity experiments? *Brain Research Reviews, 28*, 143-154.

McIntyre, J., Zago, M., Berthoz, A., & Lacquaniti, F. (2001a). Does the brain model Newton's laws? *Nature Neuroscience, 4*, 693-694.

McIntyre, J., Lipshits, M., Zaoui, M., Berthoz, A., & Gurfinkel, V. (2001b). Internal reference frames for representation and storage of visual information: The role of gravity. *Acta Astronautica, 49*, 111-121.

McLeod, P., McGlaughlin, C., & Nimmo-Smith, I. (1985). Information encapsulation and automaticity: Evidence from the visual control of finely-timed actions. In: M Posner, O. Marin (Eds.), *Attention and Performance XI* (pp. 391-406). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

McLeod, P, Reed, N, & Dienes, Z. (2006). The generalized optic acceleration cancellation theory of catching. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 32*, 139-148.

Merchant, H., Battaglia-Mayer, A., & Georgopoulos, A. P. (2004). Neural responses during interception of real and apparent circularly moving stimuli in motor cortex and area 7a. *Cerebral Cortex, 14*, 314-331.

Merchant, H., & Georgopoulos, A. P. (2006). Neurophysiology of perceptual and motor aspects of interception. *Journal of Neurophysiology, 95*, 1-13.

Merfeld, D. M., Zupan, L., & Peterka, R. J. (1999). Humans use internal models to estimate gravity and linear acceleration. *Nature, 398*, 615-618.

Michaels, C. F., Zeinstra, E. B., & Oudejans, R. R. (2001). Information and action in punching a falling ball. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology, 54(A)*, 69-93.

Michaels, C. F., Jacobs, D. M., & Bongers, R. M. (2006). Lateral Interception II: Predicting Hand Movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 32*, 459-472.

Michotte, A. (1963). *The perception of causality* (T. R. Miles & E. Miles, Trans.). New York: Basic Books (original work published 1946).

Minor, L.B. (1998). Physiological principles of vestibular function on earth and in space. *Otolaryngology Head & Neck Surgery, 118*, 5-15.

Miyazaki, M., Nozaki, D., & Nakajima, Y. (2005). Testing Bayesian models of human coincidence timing. *Journal of Neurophysiology, 94*, 395-399.

Montagne, G., Laurent, M., Durey, A., & Bootsma, R. (1999). Movement reversals in ball catching. *Experimental Brain Research, 129*, 87-92.

Montagne, G., Fraisse, F., Ripoll, H. & Laurent, M. (2000). Perception-action coupling in an interceptive task: First-order time-to-contact as an input variable. *Human Movement Science, 19*, 59-72.

Morey-Holton, E. R. (2003). The Impact of Gravity on Life. In L. Rothschild & A. Lister (Eds.), *Evolution on Planet Earth: The impact of the Physical Environment*. (pp. 143-159). New York: Academic Press.

Morice, A. H. P., Siegler, I. A., Bardy, B. G., & Warren, W. H. (2007). Learning new perception-action solutions in virtual ball bouncing. *Experimental Brain Research, 181*, 249-265.

N

Nagai, M., Kazai, K., & Yagi, A. (2002). Larger forward memory displacement in the direction of gravity. *Visual Cognition, 9*, 28-40.

Nijhawan, R. (sous presse). Visual Prediction: Psychophysics and neurophysiology of compensation for time delays. *Behavioral and Brain Sciences*.

O

Oberle, C. D., McBeath, M. K., Madigan, S. C., & Sugar, T. G. (2005). The Galileo bias: a naïve conceptual belief that influences people's perceptions and performance in a ball-dropping task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 31*, 643-653.

Orban, G. A., Fize, D., Peuskens, H., Denys, K., Nelissen, K., Sunaert, S., Todd, J., & Vanduffel, W. (2003). Similarities and differences in motion processing between the human and macaque brain: evidence from fMRI. *Neuropsychologia, 41*, 1757-1768.

P

Pagonis, V., Guerra, D., Chauduri, S., Hornbecker, B., & Smith, N. (1997). Effects of air resistance. *The Physics Teacher, 35*, 364-368.

Papaxanthis, C., Pozzo, T., Popov, K., & McIntyre, J. (1998). Hand trajectories of vertical arm movements in one-G and zero-G environments: Evidence for a central representation of gravitational force. *Experimental Brain Research, 120*, 496-502.

Papaxanthis, C., Pozzo, T., & McIntyre, J. (2005). Kinematic and dynamic processes for the control of pointing movements in humans revealed by short-term exposure to microgravity. *Neuroscience, 135*, 371-383.

Peper, L., Bootsma, R. J., Mestre, D. R., & Bakker, F. C. (1994). Catching balls: how to get the hand to the right place at the right time. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 20*, 591-612.

Peusner, K.D. (2001). Development of the gravity sensing system. *Journal of Neuroscience Research, 63*, 103-108.

Pisella, L., Grea, H., Tilikete, C., Vighetto, A., Desmurget, M., Rode, G., Boisson, D., & Rossetti, Y. (2000). An 'automatic pilot' for the hand in human posterior parietal cortex: toward reinterpreting optic ataxia. *Nature Neuroscience, 3*, 729-736.

Port, N. L., Lee, D., Dassonville, P., & Georgopoulos, A. P. (1997). Manual interception of moving targets: I. Performance and movement initiation. *Experimental Brain Research, 116,* 406-420.

Port, N. L., Kruse, W., Lee, D., & Georgopoulos, A. P. (2001). Motor cortical activity during interception of moving targets. *Journal of Cognitive Neuroscience, 13*, 306-318.

Proffitt, D. R., & Kaiser, M. K. (1998). Mental structure hypothesized as internalized physical structure. In J. Hochberg (Ed.), *Perception and cognition at century's end: History, philosophy, theory* (pp. 169-197). Orlando, FL: Academic Press.

R

Regan, D. (1992). Visual judgements and misjudgements in cricket, and the art of flight. *Perception 21*, 91-115.

Regan, D. (1997). Visual factors in hitting and catching. *Journal of Sports Sciences, 15*, 533-558.

Regan, D., Gray, R., Portfors, C. V., Hamstra, S. J., Vincent, A., Hong, X. H., Kohly, R., & Beverley, K. (1998). Catching, hitting, and collision avoidance. In L. Harris & M. Jenkin, (Eds.), *Vision and action*. (pp. 171-209). Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Regan, D. (2002). Binocular information about time to collision and time to passage. *Vision Research, 42*, 2479-2484.

Regan, D., & Gray, R. (2000). Visually guided collision avoidance and collision achievement. *Trends in Cognitive Sciences, 4***,** 99-107.

Ripoll, H., & Latiri, I. (1997). Effect of expertise in a fast ball game on coincident-timing accuracy. *Journal of Sport Sciences, 15,* 573-580.

Roll, J. P., Popov, K., Gurfinkel, V., Lipshits, M., Andre-Deshays, C., Gilhodes, J. C., & Quoniam, C. (1993). Sensorimotor and perceptual function of muscle proprioception in microgravity. *Journal of Vestibular Research, 3*, 259-273.

Roll, R., Gilhodes, J. C., Roll, J. P., Popov, K., Charade, O., & Gurfinkel, V. (1998). Proprioceptive information processing in weightlessness. *Experimental Brain Research, 122*, 393-402.

Rosenbaum, D. A. (1975). Perception and extrapolation of velocity and acceleration. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 1,* 395-403.

Runeson, S., Juslin, P., & Olsson, H., (2000). Visual perception of dynamic properties: Cue heuristics versus direct-perceptual competence. *Psychological Review*, *107*, 525-555.

Rushton, S. K., & Wann, J. P. (1999). Weighted combination of size and disparity: a computational model for timing a ball catch. *Nature Neuroscience, 2*, 186-190.

S

Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A., & Bootsma, R. J. (1991). 'Grasping tau'. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 17*, 315-322.

Savelsbergh, G. J. P., Whiting, H. T. A., Pijpers, J. R., & van Santvoord, A. A. (1993). The visual guidance of catching. *Experimental Brain Research, 93,* 148-156.

Schmidt, R. A. (1968). Anticipation and timing in human motor performance. *Psychological Bulletin, 70*, 631-646.

Senot, P., Prevost, P., & McIntyre, J. (2003). Estimating time to contact and impact velocity when catching an accelerating object with the hand. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 29*, 219-237.

Senot, P., Zago, M., Lacquaniti, F., & McIntyre, J. (2005). Anticipating the effects of gravity when intercepting moving objects: Differentiating up and down with non-visual cues. *Journal of Neurophysiology, 94*, 4471-4480.

Shepard, R. N. (1989). Internal representation of universal regularities: A challenge for connectionism. In L. Nadel, L. A. Cooper, P. Culicover, & R. M. Harnish (Eds.), *Neural Connections, Mental Computations*, Cambridge, MA: MIT.

Smith, M., Flach, J., Dittman, S., & Stanard, T. (2001). Monocular optical constraints on collision control. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 27*, 395-410.

Stoffregen, T. A., & Bardy, B. G. (2001). On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences, 24*, 195-213.

T

Teixeira, L. A., Chua, R., Nagelkerke, P., & Franks, I. M. (2006). Use of visual information in the correction of interceptive actions. *Experimental Brain Research, 175*, 758-63.

Timmermans, P. J., & Vossen, J. M. (2000). Prey catching in the archer fish: Does the fish use a learned correction for refraction? *Behavioral Processes, 52*, 21-34.

Timmermans, P. J. (2001). Prey catching in the archer fish: angles and probability of hitting an aerial target. *Behavioral Processes, 55*, 93-105.

Todd, J. T. (1981). Visual information about moving objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 7*, 795-810.

Tresilian, J. R. (1995). Perceptual and cognitive processes in time-to-contact estimation: Analysis of prediction motion and relative judgment tasks. *Perception & Psychophysics, 57,* 231–245.

Tresilian, J. R., & Lonergan, A. (2002). Intercepting a moving target: effects of temporal precision constraints and movement amplitude. *Experimental Brain Research, 142*, 193-207.

Tresilian, J. R., Oliver, J., & Carroll, T. J. (2003). Temporal precision of interceptive action: differential effects of target size and speed. *Experimental Brain Research, 148*, 425-438.

Tresilian, J. R. (2004a). Interceptive action: what's time-to-contact got to do with it? In H. Hecht, & G.J.P Savelsbergh (Eds.), *Time-to-contact* (pp. 109-139). Amsterdam, the Netherlands: Elsevier Science Publishers.

Tresilian J.R. (2004b). The accuracy of interceptive action in time and space. *Exercise and Sport Sciences Reviews, 32*, 167-173.

Tresilian, J. R., Plooy, A., & Carroll, T. J. (2004). Constraints on the spatiotemporal accuracy of interceptive action: effects of target size on hitting a moving target. *Experimental Brain Research, 155*, 509-526.

Tresilian J. R. (2005). Hitting a moving target: perception and action in the timing of rapid interceptions. *Perception & Psychophysics, 67*, 129-149.

Tresilian, J. R., & Houseman, J. H. (2005). Systematic variation in performance of an interceptive action with changes in the temporal constraints. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology, 58(A)*, 447-466.

Tresilian, J. R., & Plooy, A. (2006). Systematic changes in the duration and precision of interception in response to variation of amplitude and effector size. *Experimental Brain Research, 171*, 421-435.

Twardy, C. R., & Bingham, G. P. (2002). Causation, causal perception, and conservation laws. *Perception & Psychophysics, 64*, 956-968.

Tyldesley, D. A., & Whiting, H. T. A. (1975). Operational timing. *Journal of Human Movement Studies, 1*, 172-177.

V

van der Kamp, J., Savelsbergh, G. J. P., & Smeets, J. B. (1997). Multiple information sources in interceptive timing. *Human Movement Science, 16,* 787-821.

van der Kamp, J., Bennett, S. J., Savelsbergh, G. J., & Davids, K. (1999). Timing a one-handed catch. II. Adaptation to telestereoscopic viewing. *Experimental Brain Research, 129*, 369-377.

Vogels, I. M. (2004). Detection of temporal delays in visual-haptic interfaces. *Human Factors, 46*, 118-134.

Volkmann, D., & Baluška, F. (2006). Gravity: one of the driving forces for evolution. *Protoplasma, 229*, 143-148.

W

Wann, J. P. (1996). Anticipating arrival: Is the tau-margin a specious theory? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 22*, 1031-1048.

Warren, W. H. (1988). Actions mode and laws of control for the visual guidance of action. In O. G. Meijer and K. Roth (Eds.), *Complex movement behavior: « The » motor-action controversy* (pp. 339-380). Amsterdam: North-Holland.

Watamaniuk, S. N., & Heinen, S. J. (2003). Perceptual and oculomotor evidence of limitations on processing accelerating motion. *Journal of Vision, 3*, 698-709.

Werkhoven, P., Snippe, H. P., & Toet, A. (1992). Visual processing of optic acceleration. *Vision Research, 32*, 2313-2329.

White, O., McIntyre, J., Augurelle, A. S., & Thonnard, J. L. (2005). Do novel gravitational environments alter the grip-force/load-force coupling at the fingertips? *Experimental Brain Research, 163*, 324-334.

Wolpert D. M., Ghahramani, Z., & Flanagan, J. R. (2001). Perspectives and problems in motor learning. *Trends in Cognitive Sciences, 5*, 487-494.

Wolpert, D. M., & Flanagan, J. R. (2001). Motor prediction. *Current Biology, 11*, 729-732.

Wolpert, D. M., Doya, K., & Kawato, M. (2003). A unifying computational framework for motor control and social interaction. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences, 358*, 593-602.

Z

Zago, M., Bosco, G., Maffei, V., Iosa, M., Ivanenko, Y. P., & Lacquaniti, F. (2004). Internal models of target motion: Expected dynamics overrides measured kinematics in timing manual interceptions. *Journal of Neurophysiology, 91*, 1620-1634.

Zago, M., Bosco, G., Maffei, V., Iosa, M., Ivanenko, Y. P., & Lacquaniti, F. (2005). Fast adaptation of the internal model of gravity for manual interceptions: evidence for event-dependent learning. *Journal of Neurophysiology, 93*, 1055-1068.

Zago, M., & Lacquaniti, F. (2005a). The internal model of gravity for hand interception: Parametric adaptation to zero-gravity visual targets on Earth. *Journal of Neurophysiology, 94*, 1346-1357.

Zago, M., & Lacquaniti, F. (2005b). Visual perception and interception of falling objects: a review of evidence for an internal model of gravity. *Journal of Neural Engineering, 2*, 198-208.

Zago, M., & Lacquaniti, F. (2005c). Cognitive, perceptual and action-oriented representations of falling objects. *Neuropsychologia, 43*, 178-188.

Expérimentations contrôles

Expérimentations contrôles

Expérimentation contrôle de l'expérience 1

Notre modélisation des résultats fait l'hypothèse que la réponse des participants correspond à un temps de parcours de la cible (Δt dans notre modélisation) avant que le participant ne perçoive une différence entre la vitesse observée de la cible et la vitesse attendue. Nous transformons donc dans notre modèle la réponse spatiale (RA du lanceur) des participants en une réponse temporelle (temps d'action du lanceur). Nous avons donc conduit une expérience contrôle pour nous assurer que cette transformation de la réponse ne modifiait pas les résultats. Dans cette expérience contrôle, les participants indiquaient la position ou le temps à partir duquel le mouvement de la cible semble être autonome soit *a posteriori*, en indiquant la position à partir de laquelle le mouvement de la cible est autonome (comme dans la première expérience), soit pendant l'essai (*temps réel*) en pressant la barre espace. Les participants réalisaient les deux types de réponse en deux blocs contrebalancés, dans la condition *verticale avec friction*. Vingt participants ont été répartis en deux groupes (N = 10), l'un recevant une consigne de distance virtuelle à la cible de 1500 m (image du train et consigne écrite avant chaque essai sur la distance et la taille des objets) tandis que l'autre groupe n'avait aucune instruction sur la distance à la scène virtuelle. Enfin, les trois mêmes conditions de pentes étaient présentées, -30°, 0° et +30°.

Nous avons réalisé une analyse de corrélation entre les RA calculés selon le type de réponse (*a posteriori* vs. *temps réel*) pour chaque consigne de distance. Celle-ci montre une corrélation significative $r = 0.80$, $p < .05$ pour la condition sans consigne de distance, et une corrélation significative $r = 0.88$, $p < .05$ pour la condition 1500 m. De plus, une ANOVA réalisée sur le RA obtenu dans la condition *temps réel* ou *a posteriori* selon la consigne de distance (pas de consigne vs. 1500 m) ne montre aucun effet de la consigne, ni dans la condition *temps réel*, $F(1, 54) = 3.15$, $p > .05$, ni dans la condition *a posteriori*, $F(1, 54) = 1.65$, $p > .05$. Ces deux résultats nous confirment deux choses. Premièrement, la

transformation du RA (réponse spatiale) en temps de parcours (Δt, réponse temporelle) dans notre modélisation ne modifie pas les résultats, et l'absence d'effet quantitatif des variables physiques de l'environnement ne vient pas d'un biais de notre modèle basé sur à la détection d'une différence de vitesse. Deuxièmement, ces résultats confirment l'absence d'effet de la consigne de distance sur le RA. Quel que soit le mode de réponse, et quelles que soient les conditions expérimentales (notamment présence de friction et orientation de l'écran), une consigne de distance donnée aux participants ne modifie pas les réponses de ceux-ci.

Expérimentation contrôle 1 de l'expérience 3

Dans l'expérience 3, il est possible que les résultats obtenus par les participants s'expliquent par la relation entre la cinématique de la balle et celle de l'intercepteur. En effet, lors de l'interception de la balle chutant à 0g, l'effecteur et la balle se déplacent à vitesse constante, tandis que lorsque la balle chute à 1g, celle-ci accélère alors que l'effecteur se déplace à vitesse constante. Il est possible qu'il soit plus facile pour les participants de déterminer précisément à quel moment la réponse doit être initiée si l'effecteur et la balle se déplacent selon le même profil cinématique. Suivant cette hypothèse, les résultats obtenus dans l'expérience 3 seraient biaisés du fait d'une condition (balle chutant à 0g) dans laquelle les participants détermineraient plus facilement le moment d'initiation idéal que dans l'autre condition (balle chutant à 1g).

Nous avons donc conduit une expérience contrôle afin de vérifier cette hypothèse. Dans cette expérience, les participants devaient intercepter indirectement une balle accélérant ou chutant à vitesse constante avec un effecteur qui pouvait se déplacer en accélérant ou à vitesse constante. La balle et l'effecteur avaient un diamètre de 0.5 cm et arrivaient toujours au point d'interception avec une vitesse de 0.25 m/s, définissant toujours la même fenêtre temporelle d'interception de ±20 ms dans les quatre combinaisons possibles (effecteur

accélérant vs. à vitesse constante × balle accélérant vs. à vitesse constante). La scène visuelle était affichée sur un écran d'ordinateur positionné devant le participant. Dans cette expérience, 24 participants ont été répartis en 4 groupes (N = 6). Chaque groupe réalisait 30 essais en bloc dans une combinaison de cinématique de l'effecteur et de la balle. Aucun entraînement n'était réalisé avant l'expérience, les participants découvraient donc durant l'expérience les cinématiques de la balle et de l'effecteur. Après chaque essai, les participants recevaient un feedback sur leur performance (erreur en ms). Les paramètres des cinématiques de la balle et de l'effecteur sont donnés dans le tableau 6.

Tableau 6 : cinématique de la balle et de l'effecteur selon la condition d'accélération pour une fenêtre d'interception de ±20 ms.

	Accélération ($m.s^{-2}$)	Vitesse initiale ($m.s^{-1}$)	Temps de mouvement (s)
Balle accélérée	0.25	0	1
Balle à vitesse constante	0	0.25	1
Effecteur accéléré	0.25	0.175	0.3
Effecteur à vitesse constante	0	0.25	0.3

Une ANOVA sur EC et EA a été menée avec le plan d'analyse :

S⟨Accélération de la balle (2) ×Accélération de l'effecteur (2)⟩ × Répétition (30)

L'ANOVA sur EC ne montre pas d'effet de l'accélération de la balle sur les résultats, $F(1, 20) < 1$, avec une EC de -17 ms lorsque la balle accélère et de -26 ms lorsque la balle se déplace à vitesse constante. Ces résultats confirment avec des accélérations différentes de 1g les résultats obtenus dans l'expérience 3, et montrent encore une fois une EC négative, confirmant la tendance des participants à arriver en avance dans cette tâche. L'ANOVA montre par contre une différence dans l'EC selon l'accélération de l'effecteur, $F(1, 20) = 5.31$, $p < 0.05$, avec une EC de -35 ms lorsque l'effecteur accélère et de -7 lorsque l'effecteur se déplace à vitesse constante. Enfin, aucune interaction Accélération de la balle × Accélération

de l'effecteur n'est démontrée par l'ANOVA, $F(1, 20) < 1$. L'analyse de EA montre des résultats similaires pour l'accélération de la balle, $F(1, 20) < 1$, et l'accélération de l'effecteur, à la différence près que l'effet est marginal sur EA, $F(1, 20) = 3.88$, $p = .06$, avec une EA moyenne de 86 ms dans la condition effecteur accélérant et 67 ms lorsque l'effecteur se déplace à vitesse constante. Enfin, aucun effet Accélération de la balle × Accélération de l'effecteur n'est mis à jour par l'ANOVA, $F(1, 20) < 1$.

Les résultats de cette expérience contrôle invalident l'hypothèse de meilleurs résultats lorsque l'effecteur et la balle à intercepter ont le même profil cinématique, et confirment ainsi les résultats de l'expérience 3. Cependant, dans les actions d'interception indirecte, une partie du succès s'explique par la capacité des participants à intégrer le temps de déplacement de l'effecteur pour anticiper d'autant leur réponse par rapport à l'arrivée de la balle au point d'interception. Les résultats de cette expérience contrôle démontrent que cette intégration est plus facile lorsque l'effecteur se déplace à vitesse constante que s'il accélère.

Expérimentation contrôle 2 de l'expérience 3

Dans l'expérience 3, l'erreur initiale et la diminution de l'erreur commise avec l'apprentissage au test peuvent refléter deux choses : tout d'abord une difficulté à intégrer les caractéristiques de la nouvelle trajectoire comme nous l'avons interprété, mais aussi un biais méthodologique comme une difficulté à estimer et prendre en compte le temps de mouvement de l'effecteur (qui était de 700 ms pour atteindre le point d'interception), condition impérative pour réussir la tâche, et qui serait due à un apprentissage insuffisant lors de l'entraînement. D'autres biais peuvent aussi expliquer cette erreur initiale, comme une insuffisance d'apprentissage, ou encore un effet de la pause entre les essais d'entraînement et du test. En d'autres termes, l'erreur initiale élevée observée au test était-elle due à la tâche à réaliser, ou à

un apprentissage trop court ou trop espacé du test ? Pour le déterminer, nous avons conduit une deuxième expérience contrôle.

Dans cette expérience, 9 participants ont réalisé 20 essais d'entraînement identiques à celui proposé dans l'expérimentation 3 (point de départ de la balle situé à droite et en haut du point d'interception, atteint 700 ms après son départ). Puis, passée une première pause de 5 minutes, les participants réalisaient un post test (post test 1) de 10 essais identiques aux essais d'entraînement. Après une nouvelle pause de 5 minutes, les participants réalisaient à nouveau un post test (post test 2) de 10 essais identiques aux essais d'entraînement. Après chaque essai, les participants recevaient un feedback sur leur performance (erreur en ms).

Si l'erreur initiale du test était due à une pratique insuffisante et donc une mauvaise intégration du temps de parcours de l'effecteur, ou le temps de pause séparant le test du post test 1 ou le post test 1 du post test 2, nous devrions observer une erreur initiale aux post tests 1 et 2 élevée. Par contre, si l'apprentissage était suffisant et que l'erreur initiale élevée provient de la tâche à réaliser, l'erreur initiale au post test 1 et 2 ne devrait pas différer des erreurs commises à la fin du test et du post test 1.

Pour vérifier que les performances en début de post test 1 et 2 correspondent bien aux performances atteintes en fin de test ou de post test 1, nous avons comparé par un t de student l'EC du dernier essai du test à l'EC du premier essai du post test 1, ainsi que l'EC du dernier essai du post test 1 à l'EC du premier essai du post test 2.

Les résultats montrent très clairement que l'erreur initiale au post test 1 et au post test 2 ne diffère pas de l'erreur finale au test et au post test 1, avec respectivement $t(16) = -0.33$, $p > .05$ et $t(16) = -0.09$, $p > .05$. (Figure 45). Cette deuxième expérience contrôle nous permet donc de rejeter une erreur initiale élevée dans le test du fait d'un apprentissage insuffisant du

temps de mouvement de l'effecteur. Si nous observons des erreurs initiales si élevées dans le test, cela provient bien de la tâche.

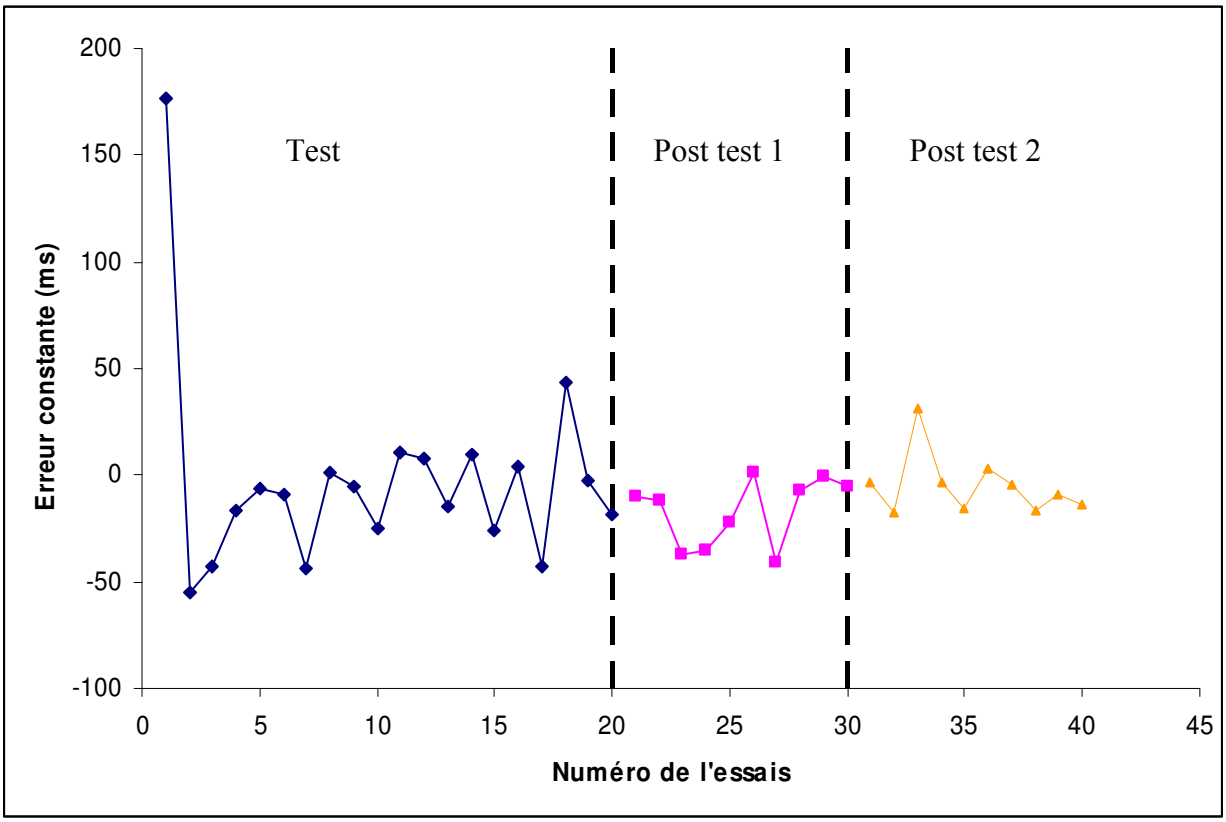


Figure 45 : Evolution de l'erreur commise à l'expérience contrôle 2 durant le test, post test 1 et post test 2.

Annexes

Tableau 7: rayon d'action (en pixels) du lanceur sur la cible pour chaque condition de consigne de distance, friction, orientation de l'écran et pente de l'expérimentation 1.

Distance	Friction	Horizontal -30°	Horizontal 0°	Horizontal +30°	Vertical -30°	Vertical 0°	Vertical +30°
15	Friction	239.89	156.83	214.94	286.31	186.92	255.26
15	Friction	121.53	130.57	111.06	183.55	189.54	114.32
15	Friction	189.33	187.75	216.94	213.18	214.72	125.04
15	Friction	172.14	182.68	120.16	141.55	150.59	82.12
15	Friction	139.37	138.78	85.23	127.78	84.74	55.05
15	Friction	125.15	116.24	90.53	308.75	223.02	194.32
15	Friction	260.74	264.06	318.40	281.46	281.05	261.09
15	Friction	208.97	130.76	117.40	467.02	132.72	89.39
15	No friction	271.54	301.05	257.64	369.58	320.38	349.66
15	No friction	334.45	245.59	300.57	344.71	236.44	259.91
15	No friction	113.01	117.84	93.62	71.43	87.37	80.04
15	No friction	228.59	225.18	167.97	288.09	238.19	175.57
15	No friction	134.06	162.97	128.12	174.80	183.74	147.33
15	No friction	258.62	229.38	249.14	309.07	279.44	310.64
15	No friction	83.35	84.49	75.38	59.84	43.35	16.96
15	No friction	288.33	248.12	259.84	324.46	279.02	305.80
1500	Friction	61.03	95.60	255.91	52.33	136.36	268.79
1500	Friction	325.76	220.53	239.98	397.50	263.57	255.13
1500	Friction	70.40	66.17	77.44	94.29	83.39	42.78
1500	Friction	429.77	302.50	186.78	453.77	309.02	203.99
1500	Friction	225.36	201.20	230.36	229.13	209.71	196.39
1500	Friction	147.00	158.46	128.46	108.40	85.06	79.07
1500	Friction	96.93	78.22	44.42	158.29	129.82	65.70
1500	Friction	91.01	107.58	138.99	30.03	30.64	10.87
1500	No friction	116.03	137.09	114.64	64.37	69.23	55.89
1500	No friction	173.54	157.07	153.07	234.52	218.48	223.75
1500	No friction	209.76	189.18	185.33	212.67	205.27	217.03
1500	No friction	268.71	275.46	277.89	243.03	240.73	247.99
1500	No friction	212.64	174.50	201.71	263.17	267.17	275.45
1500	No friction	207.32	212.21	166.82	197.42	174.21	114.32
1500	No friction	262.03	237.97	154.61	205.44	203.22	195.82
1500	No friction	325.08	267.54	319.64	275.79	258.15	251.48
Pas de consigne	Friction	181.67	190.76	174.02	313.77	236.92	163.78
Pas de consigne	Friction	242.16	132.30	68.21	243.45	161.43	89.90
Pas de consigne	Friction	194.64	230.18	218.12	229.71	221.74	201.29
Pas de consigne	Friction	311.39	294.36	276.26	294.74	286.22	222.61
Pas de consigne	Friction	182.45	185.02	135.70	497.68	192.55	95.35
Pas de consigne	Friction	108.35	103.60	105.16	128.55	89.75	58.49
Pas de consigne	Friction	255.38	253.28	267.63	340.77	250.91	166.30
Pas de consigne	Friction	173.33	172.36	173.15	236.48	209.72	171.46
Pas de consigne	Friction	229.69	185.30	148.02	107.18	82.38	61.90
Pas de consigne	Friction	205.53	201.92	195.39	301.71	163.01	88.23
Pas de consigne	No friction	235.46	258.23	245.75	293.63	211.16	132.34
Pas de consigne	No friction	327.35	287.03	295.90	154.46	242.83	145.08
Pas de consigne	No friction	263.46	235.95	280.53	389.41	319.77	363.28
Pas de consigne	No friction	368.09	322.79	338.07	300.77	306.38	322.19
Pas de consigne	No friction	374.18	358.95	349.60	390.52	360.87	366.96
Pas de consigne	No friction	78.62	78.79	91.31	72.58	86.73	68.56
Pas de consigne	No friction	253.08	227.94	224.45	396.91	389.09	392.38
Pas de consigne	No friction	405.78	369.13	420.14	359.95	332.72	372.67
Pas de consigne	No friction	183.11	183.44	180.65	211.95	199.03	227.55
Pas de consigne	No friction	222.52	225.51	212.78	360.38	272.76	241.86

Annexe B

Pour calculer quelle $D_{Scène}$ subjective a réellement été utilisée par les participants entre la scène visuelle et la scène virtuelle :

Dans la condition friction et pente de 0°, nous faisons le postulat que la gravité utilisée correspondait à la valeur de la gravité terrestre (9.81 m/s²). Nous avons aussi déterminé cinq valeurs de coefficient de frottement (μ = 0.1 ; 0.5 ; 1.0 ; 1.3 et 1.8) rencontrés par la cible.

Connaissant g et μ, a s'obtient par l'équation suivante : $a = \mu.g$.

Or $a = \frac{S.Vobs}{\Delta t}.D_{Scène}$,

où S est le pourcentage de variation de vitesse détecté par les participants (15% ou 100%) et utilisé pour répondre, Vobs : vitesse du carré à l'écran, $\triangle$t le temps de parcours du mobile avant que le participant ne perçoive une différence entre la vitesse observée du mobile et la vitesse attendue.

De plus, $D_{Scène} = \frac{a.\Delta t.D_{Ecran}}{S.Vobs}$

où D_{Ecran} est la distance réelle entre les participants et l'écran de l'ordinateur.

Donc $D_{Scène} = \frac{\mu.g.\Delta t.D_{Ecran}}{S.Vobs}$

Connaissant maintenant $D_{Scène}$ subjective dans la condition 0°, nous faisons l'hypothèse que la même valeur est utilisée dans les conditions -30° et +30°, et obtenons l'accélération utilisée par :

$a = \frac{S.Vobs}{\Delta t}.D_{Scène}$

Annexe C

Tableau 8 : Exemple de filtrage des données utilisé dans les différentes expériences. Pour chaque essai, nous calculons la moyenne de l'erreur constante (M_{EC}) commise par tous les participants à cet essai, ainsi que son écart type (SD). Si l'erreur commise par un participant n'est pas comprise entre M_{EC}-2SD et M_{EC} +2SD (erreur en rouge dans le tableau), elle est alors remplacée par M_{EC} calculée en ne prenant pas en compte cet essai. Par exemple, l'essai 4 du participant 3 n'étant pas compris entre -83 et 129, celle-ci est remplacée par l'erreur moyenne de l'essai 4 excluant l'erreur commise par le participant 3.

	Essai 1	Essai 2	Essai 3	Essai 4	Essai 5	Essai 6	Essai 7	Essai 8	Essai 12	Essai 14
Participant 1	30	75	-44	88	127	83	-14	121	114	87
Participant 2	199	-72	-14	36	8	10	6	0	6	-54
Participant 3	12	116	43	-55	109	11	43	11	57	13
Participant 4	198	116	77	43	49	38	51	-5	-23	-52
Participant 5	213	154	32	111	76	23	145	1	58	86
Participant 6	191	200	-1	10	56	-45	68	39	5	-44
Participant 7	138	-48	13	65	-41	56	-29	36	6	29
Participant 8	252	97	-12	13	21	30	-3	82	53	15
Participant 9	-46	-39	-42	20	-12	-4	-38	14	-2	-9
Participant 10	29	84	72	107	9	13	12	74	-15	-68
Participant 11	-20	130	100	32	72	35	29	169	55	107
Participant 12	157	27	-34	105	-20	21	21	31	54	116
Participant 13	49	0	120	-12	96	152	54	-3	-21	86
Participant 14	-67	81	12	60	66	37	90	3	55	-7
Moyenne	95	66	23	45	44	33	31	41	29	22
Ecart type	108	81	53	49	51	45	49	53	40	65
M-2EC	-121	-96	-83	-53	-58	-57	-67	-64	-52	-107
M+2EC	312	228	129	142	146	123	130	146	109	151

Annexe D

Tableau 8. : Erreurs commises et attendues aux essais pièges sur la base d'une utilisation de la distance, de la vitesse, de TTCg ou TTC1.

Accélération piège (m/s²)	Erreur attendue (ms) si le sujet répond en se basant sur:				Erreur commise (ms)
	Pour une vitesse fixe	A une distance fixe	En se basant sur TTCg	En se basant sur TTC1	
14.72 (g +50%)	50	109	70	197	106
14.22 (g +45%)	45	102	65	194	63
13.73 (g +40%)	40	91	59	191	63
13.24 (g +35%)	35	82	53	189	59
12.75 (g +30%)	30	73	46	186	76
12.26 (g +25%)	26	63	39	183	36
11.77 (g +20%)	20	51	32	179	7
11.28 (g +15%)	15	40	25	176	38
10.79 (g +10%)	9	27	17	173	24
10.30 (g +5%)	5	13	9	170	9
9.32 (g -5%)	-5	-17	-9	163	8
8.83 (g -10%)	-10	-34	-19	159	-23
8.34 (g -15%)	-15	-52	-30	155	-7
7.85 (g -20%)	-18	-72	-41	151	-45
7.36 (g -25%)	-22	-94	-53	146	-34
6.87 (g -30%)	-24	-118	-66	142	-47
6.38 (g -35%)	-25	-145	-81	137	-78
5.89 (g -40%)	-25	-176	-96	133	-74
5.40 (g -45%)	-21	-210	-114	127	-91
4.91 (g -50%)	-14	-251	-133	122	-84

Influence de la gravité sur la perception et l'interception d'objets en mouvement

Résumé. Pour expliquer le succès des individus dans des tâches d'interception d'objets accélérés par la gravité malgré sa faible détection par le système visuel, plusieurs études ont récemment suggéré que la gravité soit internalisée dans un modèle interne de la gravité permettant l'accès au temps de contact (TTC) exact lors de l'interception d'objets en chute libre. Cependant, on peut se demander si certains problèmes méthodologiques et théoriques ne peuvent pas remettre en cause la démonstration de l'existence et l'utilisation effective d'un tel modèle. Le but de ce travail doctoral a été de déterminer de quelle manière notre connaissance de la gravité influence notre perception et nos actions. Pour cela, nous avons conduit six expérimentations issues de trois paradigmes différents, celui des jugements perceptifs, des actions d'interception indirectes et des actions d'interception directes. Les résultats obtenus infirment l'utilisation d'un modèle interne quantitatif de la gravité, et au contraire suggèrent l'utilisation de la gravité comme une connaissance implicite qualitative de la physique, qui aurait pour conséquence de modifier nos jugements perceptifs et nos mouvements d'interception sans permettre de calculer quantitativement les effets de la gravité.

Mots clés. Modèle interne de la gravité ; Connaissance implicite qualitative de la physique ; Jugement perceptif ; Action d'interception.

Influence of gravity on perception and interception of moving objects

Abstract. In order to explain Humans' success in interceptive actions of gravitationally accelerated objects, despites the low capacity of the visual system to detect it, several studies have recently suggested that gravity has been embodied in a quantitative internal model of gravity thereby permitting access to exact time-to-contact (TTC) when intercepting a free falling object. However, we may wonder if theoretical and methodological concerns in these experiments can not call into question the effective demonstration of the existence and use of such a model. The goal of this doctoral work was to determine how our knowledge of gravity influences our perception and actions. We conducted six experimentations issued from three different paradigms, perceptive judgement, indirect interception and direct interception. Our results refute the use of a quantitative internal model of gravity, and plead in favour of the use of our knowledge of gravity as a qualitative implicit physics knowledge, which would modulate our perceptive judgements and interceptive movements but without giving access to the quantitative effects of gravity.

Keywords. Internal model of gravity; Qualitative implicit physics knowledge; Perceptive judgement; Interceptive action.