

L'extrapolation du mouvement (*Representational Momentum*) dans les scènes visuelles dynamiques

Colin Blättler^{1*}, Vincent Ferrari², André Didierjean³
et Évelyne Marmèche⁴

¹ *Laboratoire de Psychologie Cognitive, Université de Provence, Marseille, France*

² *Centre de Recherche de l'Armée de l'air, Salon-de-Provence, France*

³ *Université de Franche-Comté, Besançon, France*

⁴ *CNRS, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Marseille, France*

RÉSUMÉ

L'effet de *Representational Momentum* (traduit par nous Extrapolation du Mouvement, EM) réfère à la tendance des observateurs à « se souvenir » du point d'arrêt d'une scène dynamique de façon décalée dans le sens du mouvement (*cf.* Freyd et Finke, 1984). Dans la revue de question présentée nous montrons tout d'abord que ce biais perceptif reflète certaines propriétés physiques du mouvement. Nous montrons ensuite comment l'EM est modulée par certaines caractéristiques cognitives de l'observateur : les processus attentionnels, ainsi que les connaissances de l'observateur vis-à-vis des situations rencontrées et son expertise dans le domaine de connaissance en jeu. Nous soulignons, en conclusion, les liens entre perception et action, l'observateur devant toujours agir ou réagir, face aux scènes dynamiques auxquelles il est confronté.

Representational momentum in visual dynamic scenes

ABSTRACT

Representational Momentum refers to the tendency of observers to “remember” the stopping point of a dynamic scene as being farther along in the direction of motion that it was in reality (Freyd & Finke, 1984). Studies reported in the first part of this review show that this perceptive bias reflects some physical properties of the movement. In the second part of this review, we reported studies that attest that Movement Extrapolation may be modulated by certain cognitive characteristics of the observer: attentional processes which are developed, observer's familiarity relative to the scenes, and his/her expertise

*Correspondance : Colin Blättler, Laboratoire de Psychologie Cognitive, Université de Provence UMR 6146 Pôle 3C, Bâtiment 9 Case D3, Place Victor Hugo, 13331 Marseille Cedex 3, France. Email : colin.blattler@etu.univ-provence.fr

in the knowledge domain. In conclusion, we stressed the links between perception and action, showing that observers have always to act or re-act to the dynamic scenes they are faced up.

Le monde dans lequel nous vivons et agissons est un monde toujours en mouvement. Des objets se déplacent dans l'environnement, et l'environnement peut lui-même être dynamique. De plus, très souvent, alors que nous sommes en train d'observer des éléments qui se déplacent, nous sommes nous-mêmes en mouvement. Par exemple lorsque nous conduisons un véhicule, que nous croisons ou doublons d'autres véhicules qui eux-mêmes se déplacent, la scène perçue est alors différente à chaque instant. La capacité à anticiper l'évolution probable des scènes dynamiques auxquelles nous sommes confrontés, ou dans lesquelles nous sommes embarqués, est assurément l'une des clés de l'adaptation de l'homme à son environnement. Sans cette adaptation, et compte tenu des délais de traitement de l'information, nos décisions se fonderaient sur une représentation obsolète du monde. De très nombreuses recherches en psychologie ont étudié comment le système cognitif traite en temps réel cette contrainte de l'environnement : quand le traitement cognitif d'une scène est terminé, celle-ci a déjà changé. Cette question essentielle a été abordée sous des facettes très variées, mais qui mettent toutes l'accent sur les processus d'anticipation. Pensons par exemple à la rapidité avec laquelle la mantisse, redoutable dévoreuse, réagit à l'abeille qu'elle va dévorer, ou à la rapidité avec laquelle un pilote d'avion peut agir pour éviter une catastrophe, ou encore aux prouesses des joueurs de tennis dont les capacités motrices d'anticipation sont exceptionnelles. Dans cette revue de question nous avons choisi de nous centrer sur un aspect très spécifique de cette question : comment le système cognitif gère une interruption brève du flux perceptif. Lorsque nous sommes au volant de notre voiture, notre perception est souvent interrompue, parce que nous clignons des yeux, regardons notre vitesse sur le tableau de bord ou passons les essuie-glaces. Or, après cette brève interruption, alors que la scène a changé sous nos yeux, nous avons un sentiment fort de continuité entre la scène qui précède l'interruption et celle qui lui succède. Ce phénomène a été étudié en psychologie depuis une trentaine d'années dans le cadre d'un domaine nommé *Representational Momentum*¹.

¹Nous avons choisi dans cette revue de traduire *Representational Momentum*, par « Extrapolation du Mouvement », EM., sachant que d'autres auteurs francophones ont fait des choix différents. Ces termes nous semblent permettre d'évoquer le prolongement probable du mouvement observé.

Nous présenterons dans cette revue de question comment cette « Extrapolation du Mouvement », élaborée par l'observateur, se construit sur la base des caractéristiques du mouvement de l'objet et de son contexte (partie 1), mais également sur la base des connaissances propres à l'observateur (Partie 2).

Dans la partie 1, nous exposerons ainsi des recherches qui montrent que l'internalisation de quelques-uns des principes fondamentaux de la physique peut expliquer comment l'extrapolation du mouvement est modulée par des paramètres physiques propres à l'objet (sa masse et sa vitesse, par exemple) ou à la scène en mouvement. Dans la partie 2, l'accent sera mis sur les caractéristiques cognitives de l'observateur qui, elles aussi, modulent l'ampleur de l'extrapolation. Nous présenterons tout particulièrement comment les processus attentionnels peuvent moduler cet effet, et comment l'expérience des observateurs à l'égard des scènes dynamiques présentées joue un rôle dans les processus d'anticipation qui sont développés.

1. L'INTERNALISATION DES LOIS PHYSIQUES DANS L'EXTRAPOLATION DU MOUVEMENT

1.1. L'extrapolation du mouvement mime le mouvement physique

Dans une expérience princeps, Freyd et Finke (1984) ont élaboré un paradigme expérimental élégant pour étudier l'extrapolation du mouvement (EM). Les auteurs présentaient successivement trois orientations différentes d'un même rectangle afin d'induire un mouvement de rotation. Après cette phase d'induction de mouvement, une quatrième orientation du rectangle était présentée. Ce quatrième rectangle pouvait avoir, soit exactement la même orientation que le troisième, soit une orientation indiquant une poursuite du mouvement de rotation, soit une orientation indiquant un début de rotation inverse de celle induite. Chaque rectangle était présenté 250 ms et le délai entre chaque présentation était de 250ms. La tâche des participants était d'indiquer si la quatrième orientation du rectangle était, ou non, la même que la troisième (voir Figure 1).

Les résultats ont montré que les orientations poursuivant le mouvement de rotation induit étaient plus difficiles à rejeter que celles indiquant un début de rotation dans le sens inverse de celui induit. Ce pattern de résultats

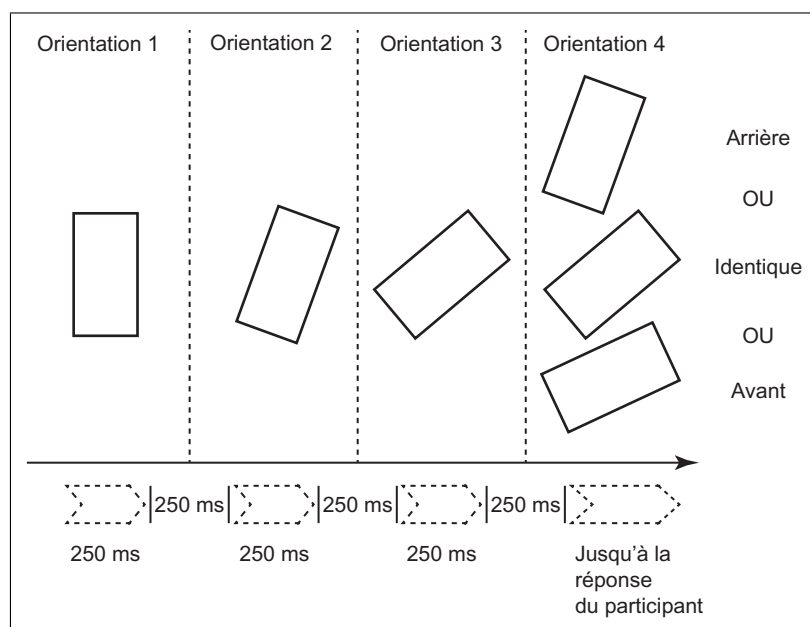


Figure 1. Procédure de Freyd et Finke (1984). La présentation successive de trois orientations d'un rectangle induit un mouvement de rotation de ce rectangle.

Figure 1. Procedure from Freyd and Finke (1984). The successive presentation of three orientations of a rectangle induces a movement of rotation of this rectangle.

n'est pas observé lorsqu'aucun mouvement n'est induit (par exemple en permutant la troisième orientation et la seconde). Selon les auteurs, l'induction du mouvement activerait chez l'observateur une représentation spatiale erronée de la troisième orientation du rectangle. Tout se passe en effet comme si les participants encodent la position spatiale de la troisième orientation de façon décalée dans le sens du mouvement induit. Ces résultats permettent aux auteurs de conclure à l'existence d'une certaine analogie entre le mouvement représenté et le mouvement réel d'un objet.

Dans cette optique, Freyd et Finke (1985) ont analysé l'effet de la vitesse de déplacement d'un objet sur l'EM. Dans un protocole globalement identique à celui employé dans leur précédente étude (Freyd & Finke, 1984), deux conditions expérimentales étaient contrastées : le mouvement était, soit rapide, soit lent. Les résultats ont clairement montré un déplacement plus important de la position spatiale encodée lorsque la vitesse est rapide. Prolongeant ces résultats, Finke, Freyd et Shyi (1986) ont testé l'effet d'une

accélération ou d'une décélération du mouvement induit. Leurs résultats ont montré que lorsque la cible accélère, la position spatiale représentée par l'observateur est fortement décalée dans le sens du mouvement. À l'inverse, une décélération de la cible entraîne un faible décalage de la représentation de la position spatiale (voir aussi Finke & Shyi, 1988 pour des résultats similaires). De plus, lorsque le mouvement induit une décélération jusqu'à une vitesse proche de zéro, aucun déplacement de la dernière position mémorisée n'est obtenu. Ce dernier résultat constitue un argument supplémentaire en faveur de l'hypothèse d'une certaine similitude entre les propriétés du mouvement physique et celles du mouvement représenté.

Hubbard et Bharucha (1988) ont mis en œuvre un protocole expérimental différent pour évaluer l'EM. Il est présenté aux participants une cible (un point) se déplaçant de façon continue (ici le mouvement est apparent et non induit comme dans les expériences précédemment citées) et rectiligne, soit du bas vers le haut, soit du haut vers le bas, soit de droite à gauche soit de gauche à droite (voir Figure 2). Après quelques instants d'animation, la cible disparaissait de façon inopinée. Dès que la cible disparaissait, le pointeur de la souris (en forme de croix) apparaissait afin

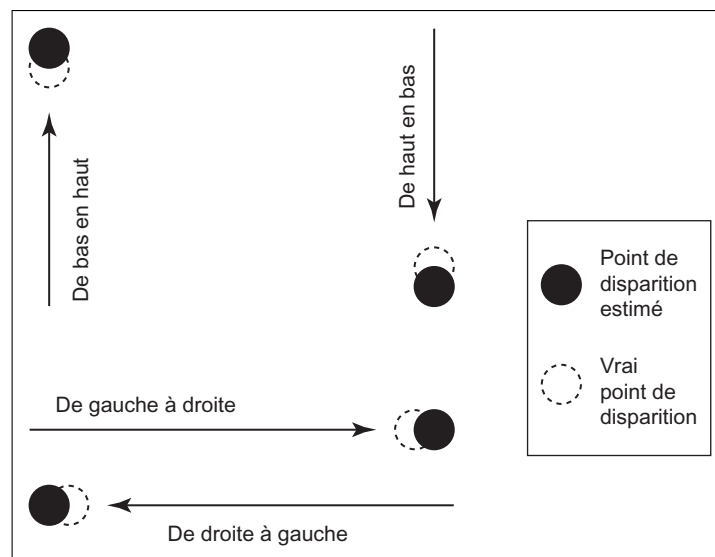


Figure 2. Matériel et résultats adaptés de Hubbard et Bharucha (1988)

Figure 2. Material and results adapted from Hubbard and Bharucha (1988)

que le participant clique à l'endroit qu'il pensait être celui de la disparition de la cible.

Les résultats montrent que les participants rappellent la position de la cible, au moment de sa disparition, non pas à l'emplacement exact, mais un peu plus loin dans le sens de la trajectoire de la cible. Cette EM se produit quel que soit le sens de déplacement, vertical ou horizontal. Ainsi, une EM est observée, que ce soit pour un mouvement induit (Freyd & Finke, 1984) ou pour un mouvement apparent (Hubbard & Bharucha, 1988). Cependant, Hubbard et Bharucha (1988) ont obtenu des résultats a priori quelque peu insolites. En effet, quand la cible poursuit un mouvement du haut vers le bas, l'EM est plus forte que quand la cible poursuit un mouvement du bas vers le haut. De plus, lorsque la cible poursuit un mouvement horizontal, la cible est rappelée plus loin dans la continuité du mouvement, mais aussi un peu plus bas. Plus récemment, Hubbard (2001) rapporte que le mouvement d'une cible chutant sur une courte distance produit une EM plus restreinte que si la cible chute sur une longue distance. Lorsqu'une cible s'élève sur une longue distance ceci produit une EM plus restreinte que si la cible s'élève sur une courte distance. Selon Hubbard (1990, 1995b, 1997, 2001), l'ensemble de ces résultats (Hubbard & Bharucha, 1988 ; Hubbard, 2001 ; voir aussi Bertamini, 1993) est probablement dû à la prise en compte par l'observateur de la notion de gravité terrestre. En effet, sur terre, la force gravitationnelle entraîne l'accélération d'un objet qui chute et la décélération d'un objet qui s'élève. C'est également la gravité terrestre qui donne une forme parabolique au mouvement d'un objet se déplaçant de manière horizontale. Dans le même sens, Hubbard (1995a) a étudié l'implication de la force de friction sur l'EM. L'auteur présente une cible en mouvement (un carré) qui, selon la condition expérimentale, est en contact, ou non, avec une autre surface fixe (un rectangle). L'hypothèse défendue par l'auteur est que si les connaissances sur le monde interviennent dans l'EM, lorsqu'une cible mouvante est en contact avec une autre surface (existence alors de frottements), une annulation ou une diminution de l'EM devrait être observée. Les résultats montrent effectivement une EM plus faible dans la condition où la cible est en contact avec une autre surface (voir aussi Hubbard, 1998 ; Kerzel, 2002).

Si les études princeps ont mis en évidence certaines similitudes avec le mouvement réel d'un point de vue spatial, il reste à déterminer si l'EM partage aussi des similitudes au niveau temporel (Freyd, 1987). Freyd et Johnson (1987) ont abordé cette question, en répliquant le protocole de Freyd et Finke (1984) dans lequel différentes orientations d'un rectangle induisaient un mouvement de rotation, mais en faisant varier la latence

entre la troisième orientation présentée et la quatrième (de 10 ms à 900 ms). Les résultats obtenus montrent une augmentation de l'EM (c.-à-d., un déplacement de la position spatiale mémorisée de la cible dans le sens du mouvement induit) avec l'augmentation de la latence d'encodage (Interval Inter Stimuli : ISI). Ceci correspond à ce qui se passerait physiquement, le mouvement d'un objet perdurant quelques instants, si rien ne s'y oppose. Mais il faut noter que lorsque la valeur de l'ISI dépasse un certain seuil, ici 300 ms, cet effet diminue au fur et à mesure que la durée de l'ISI augmente. Cette diminution de l'EM après 300 ms suggère que l'évolution de l'EM est similaire au mouvement qu'aurait un objet dans la réalité, à savoir un arrêt du mouvement avec le temps. Cette similitude entre le mouvement réel et l'EM fait de cette dernière une représentation dynamique.

L'extrapolation du mouvement est un phénomène si fondamental dans la capacité de l'être humain à s'adapter à son environnement qu'il peut être observé même à partir d'une image statique, dès lors que cette dernière suggère un mouvement. Freyd (1983) montre à des participants des paires d'instantanés de photographies représentant une action en cours (par exemple un enfant effectuant un saut du haut d'un parapet). Ces paires étaient présentées séquentiellement, soit dans l'ordre chronologique (n puis $n + 1$), soit dans l'ordre inverse ($n + 1$ puis n), ou bien les deux photographies présentées étaient identiques (n puis n). La tâche des participants était de dire si les paires étaient identiques ou non. Les résultats ont montré que les photographies suivant l'ordre chronologique étaient plus difficiles à rejeter que celles présentées dans l'ordre inverse. Alors même qu'aucun mouvement n'était induit, les participants l'ont inféré en extrapolant la position spatiale de la cible dans le sens naturel suggéré par le contexte de la scène (voir aussi Freyd, Pantzer, & Cheng, 1988 ; Futterweit & Beilin, 1994).

1.2. L'extrapolation du mouvement en contexte

Les études d'Hubbard (1995a, 1998) et de Kerzel (2002) relatives au phénomène de friction montrent que l'EM est modulée par les éléments du contexte environnant. Dans ce cadre, Hubbard (1993) montre que lorsque le contexte est lui-même en mouvement, ce dernier module l'EM. Ainsi, si un rectangle (la cible) effectue une rotation à l'intérieur d'un carré plus large et concentrique (le contexte environnant) qui effectue une rotation dans le même sens, l'EM est accrue (voir Figure 3). En revanche, si la rotation du rectangle et celle du carré effectuent une rotation dans des directions opposées, l'EM est diminuée.

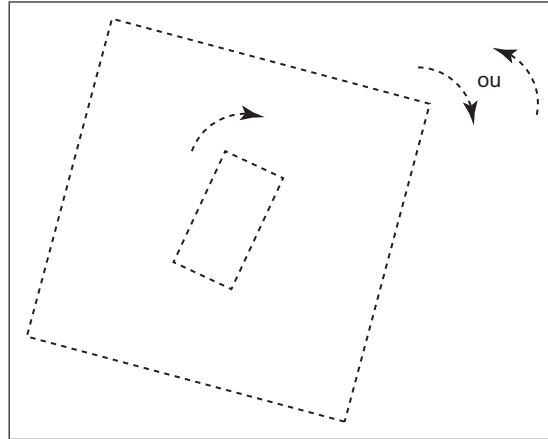


Figure 3. Matériel adapté de Hubbard (1993). La cible (le rectangle) effectue une rotation. Le carré concentrique (l'environnement) effectue une rotation dans le même sens que la cible ou dans le sens inverse.

Figure 3. Material adapted from Hubbard (1993). The target (the rectangle) is rotated. The concentric square (the environment) rotates in the same direction as the target or in the reverse direction

Les résultats obtenus par Hubbard (1993 ; voir aussi Whitney et Cavanagh, 2002, pour des résultats similaires) montrent que le mouvement d'une cible est représenté en lui associant les caractéristiques du mouvement du contexte dans lequel la cible évolue. Toutefois, il arrive que certains éléments de l'environnement soient statiques (par exemple en conduite, lorsque le conducteur, arrêté à une intersection, doit décider s'il a le temps de s'engager). Hubbard et Ruppel (1999) ont testé l'effet qu'exerce la présence d'un repère fixe sur l'extrapolation du mouvement d'une cible. Cet effet classique dans la littérature est dénommé « attraction d'un repère » (Bryant & Subbiah, 1994 ; McNamara & Diwadkar, 1997 ; Sadella, Staplin, & Burrough, 1979 ; Tversky & Schiano, 1989). La présence d'un objet fixe, qui agit comme une sorte de « repère », augmenterait l'effet d'extrapolation d'une cible en mouvement dès lors que cette dernière se dirige en direction de l'objet ou diminuerait l'extrapolation quand la cible s'éloigne du repère. Compte tenu de cet effet d'attraction, Hubbard et Ruppel (1999) font l'hypothèse que si une cible en mouvement se dirige vers un repère fixe, l'EM devrait être plus forte que si la cible s'en éloigne. Les résultats obtenus par Hubbard et Ruppel (1999) vont dans le sens de cette hypothèse en montrant que même un repère fixe peut moduler l'EM.

En résumé, il apparaît que le contexte dans lequel évolue une cible en mouvement joue un rôle important sur l'estimation du mouvement de la cible, et de son point de disparition. La simple considération du mouvement propre de la cible s'avère tout à fait insuffisante pour spécifier l'ampleur, voire la direction, du mouvement. Seule une approche intégrée de l'analyse du mouvement d'une cible en contexte peut donc permettre d'appréhender l'extrapolation du mouvement. L'approche développée par Hubbard (1995b) nous semble très prometteuse pour interpréter les mécanismes en jeu, essentiellement des mécanismes mnésiques, plus que strictement perceptifs. Selon l'auteur, ce sont les traces mnésiques relatives aux différents éléments de l'environnement (fixes ou variables), ainsi que celles relatives aux différentes positions de la cible en mouvement (réelles ou anticipées) qui seraient déterminantes pour « calculer » la position de la cible en mouvement ou sa vitesse, lorsque la cible est occultée.

Nous avons vu jusqu'à présent que l'EM peut être modulée par de nombreux facteurs comme les caractéristiques du mouvement de la cible (par exemple, sa vitesse, sa direction), les connaissances implicites des observateurs sur le monde (par exemple les lois de la gravité), ainsi que le contexte environnant la cible. Cependant, il est clair que dans le contexte des situations naturelles, d'autres facteurs interviennent tels que la profondeur de champ et le fait que dans une scène naturelle l'observateur est immergé dans le contexte. Plusieurs expériences (Hayes, Sacher, Thornton, Sereno, & Freyd, 1996 ; Hubbard, 1996 ; Nagai & Yagi, 2001) ont montré que le mouvement d'une cible qui grossit (c.-à-d. qui augmente en taille quand la cible se rapproche) ou rétrécit (c.-à-d. qui diminue en taille quand la cible s'éloigne) provoque un encodage de la taille de la cible plus large quand la cible est en train de grossir et plus restreint quand la cible est en train de rétrécir. Dans le même sens, Munger, Solberg, et Horrocks (1999) présentent des figures complexes en trois dimensions induisant un mouvement de rotation. Les résultats ont montré que des objets complexes, produisant un mouvement dans la profondeur du champ visuel, conduisent aussi à une extrapolation du mouvement. Ainsi, la représentation d'une cible en mouvement prend en compte la dynamique du contexte et les mouvements dans la profondeur du champ visuel.

Les trois caractéristiques, contexte, profondeur de champ, et complexité des éléments, influent sur le traitement des scènes naturelles. Pour se rapprocher des conditions naturelles, Thornton & Hayes (2004) montraient un film — c'est-à-dire un mouvement apparent —, en caméra statique, d'une situation naturelle présentant une foule se déplaçant. Leurs résultats montrent à nouveau une EM dans cette situation. DeLucia et Maldia (2006), et Thornton et Hayes (2004), prolongent ces résultats et abordent

un nouveau point de vue en présentant des scènes familières, susceptibles d'induire chez le participant une impression d'immersion personnelle dans la situation. Ces scènes représentent des situations simulées par ordinateur de conduite automobile, du point de vue du conducteur. Les résultats de ces études montrent qu'une EM se produit aussi dans ce contexte, permettant de penser que l'effet d'EM reflète bien un phénomène adaptatif qui est aussi en jeu dans la perception de scènes naturelles (voir aussi Blättler, Ferrari, Didierjean, Van Elslande, & Marmèche, 2010).

L'ensemble des recherches auxquelles nous avons fait référence montre qu'une extrapolation du mouvement est observée dans quantité de situations : la présentation d'images statiques pouvant induire un mouvement, la présentation de vues successives induisant un mouvement, ou la présentation de mouvement apparent. Les scènes dynamiques peuvent être très simples, constituées d'une seule cible en mouvement, ou intégrer aussi un contexte. Les scènes dynamiques peuvent être des scènes naturelles, dans lesquelles l'environnement est riche et lui-même en mouvement. Il peut aussi s'agir de scènes dynamiques dans lesquelles l'observateur est lui-même embarqué dans le mouvement. Quoi qu'il en soit, dans toutes ces scènes, un biais spatio-temporel, l'EM, est systématiquement observé : le moment de l'interruption de la scène dynamique présentée est toujours estimé par l'observateur comme étant plus loin, et plus éloigné dans le temps, qu'il n'est en réalité. De plus, l'EM est modulée par certains paramètres physiques de la cible ou de la scène en mouvement. Vitesse, accélération, contexte, gravité, friction, profondeur de champ... peuvent moduler cet effet.

Dans la perspective écologique développée par Gibson (1966), c'est la perception qui suffirait à rendre compte de l'EM, celle-ci s'étant progressivement ajustée aux invariants de l'environnement, au cours des millénaires durant lesquels l'organisme humain a été confronté aux lois physiques du mouvement. Ainsi Gibson, en 1966, a proposé que le caractère prédictif de la perception provienne d'une sorte de « résonance » entre des attentes du système nerveux et des invariants que ce dernier extrait de l'environnement extérieur (voir aussi Shepard, 1984). Cette approche écologique repose, entre autres, sur l'idée que toutes les informations pertinentes pour interagir avec notre environnement sont comprises dans les informations sensorielles et que les représentations internes ne jouent aucun rôle. Ainsi, il ne serait pas utile de postuler une représentation cognitive des informations sensorielles pour rendre compte de l'EM, notamment dans les tâches de capture. Mais de nombreux résultats, par exemple ceux de McIntyre, Zago, Berthoz et Lacquaniti (2001), montrent que, contrairement à ce que stipule l'approche écologique, les sujets

utilisent un modèle interne dans les situations d'interception d'un objet avec la main, et non uniquement des données proprement sensorielles. Par exemple, des astronautes en orbite autour de la terre, devant intercepter un objet, produisent un mouvement basé sur les lois de la gravité terrestre (accélération pendant une chute) alors que le mouvement de l'objet qu'ils perçoivent ne suit pas ces lois (vitesse constante dans un environnement sans gravité). De tels résultats attestent de l'existence d'un modèle interne, nécessaire intermédiaire entre les entrées sensorielles et les réponses motrices. De plus, les modèles internes qui ont été construits ne sont pas nécessairement immuables. Ils peuvent évoluer par apprentissage, devenir spécifiques des situations qui sont fréquemment rencontrées, devenir propres aux domaines d'expertise de l'observateur. Dans la deuxième partie de cette revue de question, nous nous intéresserons ainsi aux caractéristiques cognitives de l'observateur qui peuvent influencer sur la perception des scènes dynamiques présentées : les processus attentionnels qui sont développés, la familiarité des observateurs avec les scènes présentées ou leur expertise dans les domaines de connaissance en jeu.

2. LA MODULATION DE L'EXTRAPOLATION DU MOUVEMENT PAR L'OBSERVATEUR

2.1. Attention et extrapolation du mouvement

L'hypothèse générale testée dans un ensemble de recherches est que plus l'attention est focalisée sur la trajectoire de la cible en mouvement, plus l'EM serait faible. Dans l'une des premières recherches portant sur la relation entre attention et EM, Hayes et Freyd (2002) présentent simultanément un point qui se déplace de gauche à droite (ou de droite à gauche) et un carré qui s'agrandit ou se rétrécit. La tâche de jugement spatial porte aléatoirement sur le point ou sur le carré. Les résultats montrent que l'EM augmente lorsque l'attention est détournée de la cible en mouvement. De même, dans une condition de double tâche (les sujets doivent réaliser une tâche de comptage, en plus de la tâche principale de poursuite de la cible), les résultats montrent que l'EM est plus importante dans la condition de double tâche que dans la condition simple. Ainsi, selon les auteurs, l'EM ne serait pas seulement un processus automatique puisque l'EM peut être modulée par la charge attentionnelle dévolue à la cible. L'attention visuelle permettrait de stopper les processus d'extrapolation mentale, et lorsque le foyer attentionnel ne serait plus dirigé sur la cible,

l'EM aurait tendance à augmenter. Dans cette voie, Kerzel (2003) s'est attaché à déterminer si la présentation de distracteurs pouvait limiter, ou non, l'EM. Dans cette recherche, des distracteurs sont présentés pendant l'intervalle de rétention, c'est-à-dire après la disparition de la cible. Ces distracteurs sont non pertinents par rapport à la tâche en cours, mais peuvent provoquer des changements (involontaires) du foyer attentionnel (cf. Posner, 1980). Plus précisément, un distracteur est présenté à une certaine distance de la cible pendant l'intervalle de rétention (le distracteur est très discriminable de la cible, étant beaucoup plus grand, et présenté loin de la cible). Les résultats montrent que lorsque des distracteurs sont présentés, l'EM est, non seulement annulée, mais inversée. Cette inversion de l'EM va à l'encontre de l'hypothèse selon laquelle l'attention visuelle serait nécessaire pour stopper l'extrapolation mentale du mouvement de la cible. L'inversion de l'EM est en outre compatible avec l'hypothèse d'un moyennage en mémoire des différentes traces mnésiques (Freyd & Johnson, 1987 ; Hubbard & Ruppel, 2000). Freyd et Johnson font l'hypothèse d'une compétition entre les processus de moyennage des différentes positions spatiales d'une cible perçues avant l'arrêt du déplacement et le biais d'anticipation (EM). Ainsi, il se pourrait que la suppression de l'allocation attentionnelle sur la cible facilite l'expression du processus de moyennage en faisant disparaître le processus opposé qu'est l'EM. L'effet du traitement d'un distracteur, même non pertinent par rapport à la tâche, pourrait alors annuler, voire inverser, l'EM en détournant l'attention de la cible. Le rôle de l'attention visuelle ne serait donc pas d'arrêter le processus d'extrapolation mentale, mais de le maintenir. L'attention visuelle serait nécessaire pour que se déroule le processus d'extrapolation mentale.

Les recherches d'Hubbard, Kumar et Carp (2009) visent à apporter des preuves plus directes de l'effet de l'attention sur l'ampleur de l'EM. Elles utilisent un paradigme de *spatial cueing* (indication spatiale). Un indice (*cue*) est présenté pendant le déplacement de la cible, ou pendant l'intervalle de rétention, c'est-à-dire après la disparition de la cible. Certains indices sont considérés comme « très pertinents », au sens où ils apparaissent à l'endroit de la localisation finale de la cible, d'autres sont non pertinents (ils apparaissent au-dessus ou au-dessous de l'endroit où disparaît la cible). Les résultats montrent que la présentation d'un indice (pertinent ou non) pendant le déplacement de la cible et/ou après sa disparition entraînent une diminution de l'EM observé sans indice. Concernant la pertinence des indices, pendant le déplacement de la cible, la présentation d'indices pertinents conduit à une plus grande diminution de l'EM que la présence d'indices non pertinents. Ce pattern de résultats s'inverse dans la condition d'un indicage après la disparition de la cible.

Les résultats concernant la présentation d'indices pertinents pendant le déplacement de la cible suggèrent que ces indices joueraient un rôle d'amorçage en augmentant ainsi l'allocation attentionnelle dévolue à la cible, notamment à son point de disparition, et provoqueraient donc une diminution de l'EM. Cependant, les résultats obtenus lorsque l'indice est présenté après la disparition de la cible sont, quant à eux, compatibles avec l'hypothèse faite par Kerzel (2003) qui propose que la diminution observée de l'EM peut être due à une perturbation de l'attention dévolue à la cible. Selon Kerzel (2003), c'est le caractère « distracteur » de l'indice qui rendrait compte de la diminution de l'EM. En résumé, quels que soient le moment et la durée pendant lesquels un indice spatial est présenté, l'EM est diminuée, mais non supprimée. Focaliser l'attention sur la trajectoire de la cible et son point de disparition permettrait de réduire l'EM. Cependant, le fait de perturber le traitement de la cible en focalisant l'attention sur un distracteur, après la disparition de la cible, pourrait aussi diminuer l'EM en interrompant ou en réduisant le traitement du flot perceptif provenant de la cible.

Ces effets de l'attention sont un argument en faveur d'une certaine perméabilité des processus constitutifs de l'EM. Ce n'est pourtant pas le point de vue initialement défendu dans les premières recherches sur l'EM. Freyd (1987 ; Finke & Freyd, 1985) suggère que l'EM est un phénomène qui n'est pas influencé par des feedbacks sur les erreurs commises, argument en faveur de l'hypothèse selon laquelle l'EM est modulaire, non cognitivement pénétrable (Fodor, 1983). Pour tester cette hypothèse, Courtney et Hubbard (2008) étudient si prévenir les observateurs de l'existence de l'EM, ou les informer de leurs erreurs concernant la localisation de la cible au moment de sa disparition, peut diminuer l'EM. Dans leurs expériences, trois groupes de sujets sont comparés : des sujets « naïfs », des sujets avertis de l'EM, et des sujets, non seulement avertis de l'EM, mais auxquels il était demandé de contrecarrer cet effet. Les résultats montrent que tous les sujets présentent encore une EM, même si cet effet est néanmoins amoindri dans les deux groupes informés. Jusqu'alors, très peu de recherches ont étudié explicitement l'effet d'un feedback relatif aux erreurs de localisation sur l'ampleur de l'EM, alors que ceci constitue a priori le test le plus direct de la pénétrabilité de l'EM. En effet, si l'individu peut moduler volontairement l'EM alors il est clair que l'EM est cognitivement pénétrable. Finke et Freyd (1985) ont réalisé des expériences dans lesquelles des feedbacks sont donnés aux sujets durant la phase de familiarisation. Ces feedbacks portent sur le caractère « correct » ou « erroné » de la réponse donnée par les sujets. Les résultats montrent que ces feedbacks n'ont aucun effet sur l'ampleur de l'EM, ni dans la phase de familiarisation, ni dans la phase expérimentale.

Comme l'ont précisé Joordens, Spalek, Razmy et van Duijn (2004), cette absence d'effet pourrait cependant être due au fait que les feedbacks délivrés sont relativement peu informatifs, n'indiquant que la présence d'une erreur, mais non de sa direction, et qu'ils ne sont délivrés que pendant les quelques essais de la phase d'entraînement. En tenant compte de cette limite, Ruppel, Fleming et Hubbard (2009) ont répliqué et prolongé les études de Finke et Freyd (1985). Dans l'expérience réalisée, le feedback délivré est plus ou moins informatif selon les conditions : soit un simple feedback en termes de réussite ou d'échec, soit un feedback qui précise le sens de l'erreur (en avant ou en arrière). De plus, selon les conditions, le feedback n'est délivré que pendant la phase d'entraînement, ou bien dans quelques-uns ou dans tous les essais de la phase expérimentale. Le résultat le plus saisissant est que, globalement, le feedback, quel qu'il soit, peu ou plus informatif, ainsi que la quantité de feedback délivrée, sur peu ou sur de nombreux essais, ne diminue pas l'ampleur de l'EM. C'est dans la condition où aucun feedback n'est délivré que l'EM est le plus faible. Une interprétation possible serait que, lorsque des feedbacks sont délivrés, la focalisation de l'attention serait partiellement détournée de la cible, et du moment de sa disparition. L'attention serait surtout focalisée sur la réponse à donner, ce qui perturberait l'apprentissage proprement perceptif de la trajectoire de la cible et de son point d'arrêt (*cf.* Wulf & Prinz, 2001). L'apport systématique d'un feedback pourrait ainsi perturber les mécanismes d'apprentissage implicite mis spontanément en œuvre. L'attention serait détournée de la cible ce qui augmenterait l'EM (Hayes & Freyd, 2002).

En résumé, l'ensemble des recherches réalisées montre qu'informer les sujets de leurs erreurs, y compris lorsque le sens de l'erreur est indiqué, comme fournir des feedbacks sur de nombreux essais, ne modifie guère l'ampleur de l'EM. (voir aussi, Finke & Freyd, 1985 ; Courtney & Hubbard, 2008). Cependant, et de façon a priori quelque peu paradoxale, non seulement les feedbacks n'ont pas tendance à diminuer l'EM, mais à l'augmenter. Une interprétation possible serait que, plus l'attention est focalisée sur la cible en mouvement, et sur son point d'arrêt, plus l'ampleur de l'EM serait faible. Ces recherches manipulant directement l'attention, ou informant les sujets de l'effet EM, amènent à s'interroger sur le rôle des connaissances préalables des observateurs dans les processus constitutifs de l'EM. La partie suivante développera ce point.

2.2. Influence des connaissances des observateurs

Un ensemble de recherches montre que l'EM peut être affectée par les prédictions de l'observateur quant à la trajectoire probable de la cible

en mouvement. Des informations locales permettant la prévision de la trajectoire de la cible à court terme peuvent être utilisées, mais aussi des informations globales concernant le mouvement de la cible, extraites à partir de durées temporelles plus longues. Hubbard et Bharucha (1988) et Bharucha et Hubbard (1992) ont ainsi analysé des situations où le mouvement de la cible est périodique. Par exemple, les participants voient une cible qui se déplace horizontalement ou verticalement à vitesse constante dans un cadre. La cible rebondit périodiquement contre les parois du cadre. Selon les essais, la cible disparaît, soit dans une situation de pré-collision, soit dans une situation de collision avec la paroi la plus proche, soit après la collision. La tâche des participants est de positionner un curseur là où ils croient que la cible a disparu. Les résultats montrent que dans les situations de pré-collision et de collision, les participants positionnent le point de disparition dans le sens opposé au mouvement perçu juste avant la coupure. Tout se passe comme si les participants anticipaient le rebond de la cible sur la paroi et ainsi le changement de direction de la cible. Dans le même sens, les études de Verfaillie et d'Ydewalle (1991) montrent que l'extrapolation du mouvement peut être influencée par les « patterns » de mouvement d'une plus grande complexité que de simples trajectoires monotones. Le paradigme utilisé reprend celui de Freyd et Finke (1984), mais introduit une condition de mouvement induit dans laquelle les rotations successives du rectangle changent de sens périodiquement (voir Figure 4). Ainsi, le mouvement de la cible peut être décrit à un niveau local (un mouvement dans le sens des aiguilles d'une montre), mais aussi au niveau global concernant le mouvement périodique de la cible en déplacement (dans le sens des aiguilles d'une montre puis dans le sens inverse, etc.).

Le point crucial des analyses concerne évidemment les cas où la cible disparaît au moment de la rupture du mouvement (changement de direction). Les résultats obtenus montrent clairement qu'on n'observe plus d'extrapolation du mouvement à ces points de rupture. Ceci montre que la mémorisation de l'orientation finale du rectangle présenté est influencée par l'anticipation du mouvement global de la cible, et pas seulement par une extrapolation de son mouvement local. Tout se passe comme si les observateurs avaient pu extraire les régularités régissant le mouvement global. Ainsi, les observateurs anticiperaient le mouvement en se basant sur des connaissances en mémoire (les régularités extraites) et non uniquement sur le mouvement qu'ils sont en train de percevoir. Ces résultats sont en accord avec les recherches menées dans le cadre de l'apprentissage sériel (par ex., Jones, 1981 ; Restle, 1970) qui montrent que le système cognitif peut utiliser à la fois les propriétés locales des patterns, et leurs

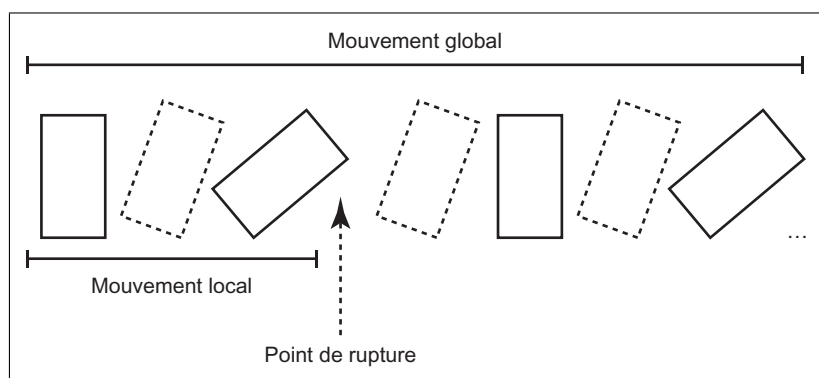


Figure 4. Matériel adapté de Verfaillie et d'Ydewalle (1991). Le rectangle est présenté successivement sous différentes orientations ce qui induit un mouvement de rotation. À certains moments la rotation change de sens (point de rupture).

Figure 4. Material adapted from Verfaillie and Ydewalle (1991). The rectangle is presented successively in different orientations that induces a rotational movement. At various times the rotation moves in the opposite direction (breaking point).

propriétés structurelles globales. Il est intéressant de noter que des résultats comparables ont également récemment été obtenus par Johnston et Jones (2006) dans le domaine de l'extrapolation de séquences auditives. Dans leur recherche, ce sont des patterns auditifs dynamiques qui sont présentés. Ceux-ci peuvent donner lieu, tant à des extrapolations locales, qu'à des extrapolations basées sur la structure mélodique globale de l'enchaînement des notes (le contour mélodique).

Un point essentiel de l'ensemble des recherches que nous avons citées est donc que l'extrapolation du mouvement peut reposer, tant sur des régularités locales, qui permettent d'anticiper la continuation immédiate du mouvement (dans les prochaines centaines de ms), que sur des régularités globales prenant en compte la trajectoire d'ensemble du mouvement en utilisant une échelle temporelle plus étendue (d'une à plusieurs secondes). L'extrapolation du mouvement dans les situations expérimentales que nous avons évoquées, mais certainement aussi dans des situations plus écologiques, nous semble donc devoir être appréhendée selon deux dimensions au moins : une dimension locale de l'évolution à court terme de la trajectoire d'une cible, prenant sans doute essentiellement en compte des paramètres dynamiques du mouvement (vitesse, accélération...), et une dimension globale à plus long terme, liée à des régularités d'ordre supérieur qui gèrent le mouvement d'ensemble de la cible.

Ces régularités temporelles, génératrices d'attentes chez l'observateur, de bas ou de haut niveau, extraites des séries dynamiques présentées de façon répétée ne sont bien sûr pas les seules à moduler les processus d'extrapolation de la trajectoire de cibles en mouvement. Notamment, les connaissances préalables des participants peuvent également jouer un rôle sur les effets d'anticipations qui sont observés.

Freyd et Jones (1994) ont étudié l'EM dans une situation où une balle est propulsée dans une spirale creuse (voir Figure 5). La tâche des participants était d'indiquer à quel endroit était positionnée la balle quelques instants après sa sortie de la spirale.

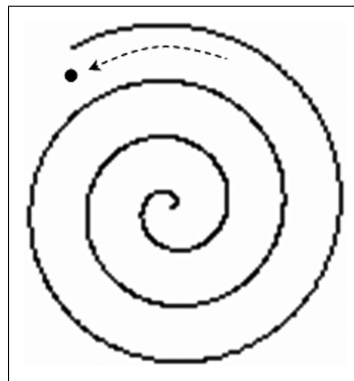


Figure 5. Matériel adapté de Freyd et Jones (1994)

Figure 5. Material adapted from Freyd and Jones (1994)

Les résultats montrent que les participants anticipent la trajectoire de la balle selon une trajectoire incurvée (c.-à-d. une trajectoire influencée par la forme de la spirale). Cependant, lorsque les auteurs interrogent les participants, dans un questionnaire post-test, sur la trajectoire que prend une balle qui sort d'une spirale, la réponse « ligne droite » est choisie par plus de 60 % des participants. Ainsi, l'EM observée reflète davantage une connaissance naïve des principes physiques qu'une connaissance explicite de ces principes chez les participants (Zago & Lacquaniti, 2005). Les recherches menées par Kozhevnikov et Hegarty (2001) vont dans le même sens et mettent l'accent sur le caractère explicite *vs* implicite des connaissances en physique qui peuvent être mobilisées. Dans cette recherche, conduite auprès d'experts et de novices en physique, les auteurs ont élaboré une tâche d'extrapolation faisant appel à des lois spécifiques de la physique (notamment sur la gravité terrestre). Les résultats

obtenus montrent que les novices comme les experts (ces derniers étant pourtant capables d'énoncer les lois physiques correctes) continuent à recourir aux principes de la physique naïve, ce qui peut conduire à des erreurs concernant la trajectoire des objets en mouvement (lorsque les lois physiques prédisent des résultats différents de ceux qui découlent de la physique naïve).

Les résultats de ces expériences vont dans le sens de l'hypothèse selon laquelle les connaissances explicites et implicites restent dissociées, et selon laquelle la connaissance implicite reste impénétrable aux connaissances conceptuelles déclaratives.

L'ensemble de ces résultats amène à souligner deux points :

- les connaissances « abstraites conceptuelles » restent souvent dissociées des connaissances implicites acquises avec l'expérience des situations ;
- le rôle de l'expérience, à savoir la confrontation régulière avec des situations du même type, semble jouer un rôle prépondérant. Ainsi, les situations familières sont le plus souvent traitées de façon adéquate, alors que les situations peu fréquentes peuvent donner lieu à des erreurs de jugement. Avec l'expérience, le système perceptivo-cognitif ne serait pas tant sensible aux principes physiques invariants qu'aux conséquences phénoménologiques de ces principes physiques (Hubbard, 1998). Les connaissances mobilisées pourraient cependant rester implicites, liées aux procédures les mieux adaptées aux modifications de l'environnement, voire devenir des routines automatisées avec l'évolution de l'expérience ou *a fortiori* de l'expertise.

Les travaux de Vinson & Reed (2002 ; voir aussi Reed & Vinson, 1996) apportent un éclairage quelque peu différent, mais néanmoins compatible avec l'idée que la familiarité avec les objets spécifiques en jeu dans les situations dynamiques à analyser, module l'EM. Les auteurs présentent deux figures strictement identiques qui sont, par exemple, dénommées soit « fusée » soit « immeuble » (Figure 6). Les résultats de Vinson et Reed (2002) montrent que l'EM est plus prononcée si l'objet mû de bas en haut est une fusée, plutôt qu'un immeuble, pourtant de même apparence. Selon les auteurs cet effet peut être attribué aux connaissances prototypiques pré-existantes des participants : l'expérience commune renverrait au fait que d'habitude une fusée s'élève, alors qu'un immeuble non. Pour interpréter ces différences, les auteurs utilisent le concept de « contexte conceptuel » relié au mouvement typiquement associé à l'objet.

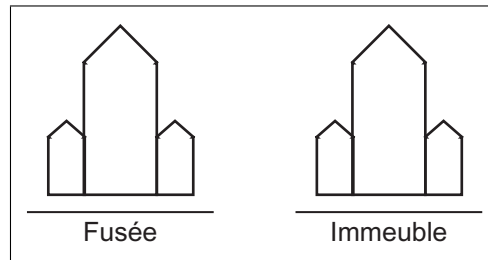


Figure 6. Matériel adapté de Vinson et Reed (2002). L'objet est mû vers le haut et est labellisé soit « fusée » soit « immeuble ».

Figure 6. Material adapted from Vinson and Reed (2002). The object is moved upwards and is labelled either “rocket” or “building”.

Les connaissances activées pour évaluer le déplacement seraient surtout des connaissances pragmatiques, liées à l'expérience, que des connaissances conceptuelles liées aux lois physiques. Le point important à souligner ici est que c'est la familiarité avec des objets perçus dans la vie quotidienne, en contexte, qui dicterait les prédictions qui peuvent être faites sur les phénomènes dynamiques. Les connaissances spécifiques sur un objet dans son environnement habituel et celles concernant ses déplacements dans cet environnement influenceraient l'extrapolation du mouvement. Habituellement, les déplacements que nous observons sont causés par diverses actions. Ce sont donc les connaissances, même implicites, pragmatiques, procédurales et automatisées, qui régiraient notre adaptation au monde environnant. Il est ainsi intéressant d'étudier l'EM dans des situations plus proches des conditions naturelles. En effet, dans la majorité des recherches sur l'extrapolation du mouvement, les observateurs sont placés dans des situations de perception passive. Dans la vie de tous les jours, au contraire, les observateurs interagissent sans cesse avec leur environnement. Par exemple, un conducteur expérimenté appliquera un schéma d'actions motrices visant à réduire la vitesse de son véhicule quand il perçoit un virage au loin, en tenant compte, comme nous l'avons déjà souligné, du contexte physique (Whitney & Cavanagh, 2002), de ses connaissances implicites, comme par exemple celles sur la gravité terrestre (Hubbard & Bharucha, 1988), ou de ses connaissances relatives aux caractéristiques du mouvement spécifique d'un objet particulier (Vinson & Reed, 2002). Ainsi, dans un contexte familier l'observateur peut mettre en œuvre ses propres connaissances, spécifiques à la situation qu'il perçoit. Les recherches sur l'expertise, qui se sont développées depuis une quarantaine d'années, à partir des travaux princeps de Chase et

Simon (1973), ont mis en évidence des différences fondamentales entre la perception des experts et celle des novices (voir Didierjean, Ferrari, & Marmèche, 2004 ; Didierjean & Gobet, 2008, pour des revues de question). Ces recherches portent pour l'essentiel sur l'expertise échiquienne. Elles montrent que les experts ont construit et utilisent de très nombreux *chunks* (des regroupements de pièces ; voir par ex., Gobet & Simon, 1996 ; Reingold, Charness, Pomplun, & Stampe, 2001) leur permettant de structurer très rapidement l'environnement de jeu. De plus, ces chunks peuvent être liés aux actions à réaliser. La perception des experts serait donc à la fois plus efficace et plus rapide, parce qu'elle intègre les aspects pertinents de l'environnement, et aussi plus opérationnelle, parce qu'elle oriente l'observateur vers les actions pertinentes à réaliser (Didierjean & Marmèche, 2005 ; Ferrari, Didierjean, & Marmèche, 2006 ; 2008). Le traitement des scènes dynamiques par l'observateur ne reposerait donc pas exclusivement sur les propriétés physiques des scènes mais aussi, et peut-être surtout, sur des traces mnésiques anticipatrices permettant d'orienter les décisions d'action à prendre pour réagir au contexte situationnel en cours. Avec la familiarité des situations rencontrées, et avec l'expertise, se développeraient des structures de connaissances permettant d'encoder rapidement et efficacement les situations rencontrées. Cet encodage particulier, dû aux connaissances spécifiques des observateurs, pourrait conduire à une extrapolation différente, mieux adaptée aux situations rencontrées.

Cette hypothèse qui considère que l'extrapolation du mouvement peut être modulée par des connaissances spécifiques des observateurs a été testée en comparant des novices et des participants expérimentés ou experts dans des tâches d'EM relatives à des scènes naturelles dynamiques. Blättler *et al.* (2010) ont analysé la perception de scènes réelles (filmées) de conduite automobile, du point de vue du conducteur. Les observateurs sont, soit des novices (ne sachant pas conduire), soit des conducteurs expérimentés. La tâche utilisée est une tâche classique d'EM. La séquence vidéo qui est présentée quelques secondes est brusquement interrompue. Puis la séquence reprend, soit à l'endroit de la coupure, soit en avant, soit en arrière. Les résultats montrent que l'extrapolation du mouvement, qui traduit un biais d'anticipation, est plus importante pour les participants expérimentés en conduite que pour les novices. La modulation de l'extrapolation du mouvement avec l'expérience dépendrait donc des connaissances spécifiques des observateurs, eu égard aux scènes dynamiques avec lesquelles ils ont l'habitude d'interagir. Ce résultat a été généralisé à d'autres situations dynamiques, comme, par exemple, des scènes simulées d'atterrissage d'avion, vues du point de vue du pilote

(cf. Blättler, Ferrari, Didierjean, & Marmèche, 2011). Cette dernière étude porte sur des pilotes experts, des pilotes de chasse de l'armée de l'air, et sur des novices n'ayant jamais observé ce type de scène. Les résultats montrent tout d'abord de manière classique que les experts en pilotage présentent un biais d'anticipation face aux scènes d'atterrissage, mais, résultat beaucoup plus rare, les résultats montrent que les novices ne présentent quant à eux aucun pattern d'anticipation. Ceci souligne le poids prépondérant des connaissances spécifiques des observateurs sur l'extrapolation du mouvement. Lorsqu'on place les participants dans des situations très peu familières, comme une scène d'atterrissage d'avion de chasse vue depuis le cockpit, aucun effet d'EM n'est observé.

CONCLUSION

L'ensemble des recherches que nous avons rapportées montre que l'extrapolation du mouvement (EM) est observée dans de très nombreuses situations dynamiques. Dans toutes ces situations, la dynamique des scènes visuelles perçues est extrapolée dans le sens du mouvement. Lorsque la tâche des observateurs est de localiser le point de disparition d'une cible en mouvement, celui-ci est systématiquement positionné plus loin, dans le sens de la trajectoire de la cible. Au moment de l'interruption du mouvement de la cible, celle-ci serait déjà encodée avec des composantes anticipatrices intégrant son mouvement futur. Ce phénomène d'extrapolation du mouvement apparaît dans des situations aussi diverses que la poursuite visuelle d'une cible en mouvement, constituée d'un simple point, que d'une cible entourée d'éléments contextuels, fixes ou eux-mêmes mobiles, ou de véritables scènes dynamiques naturelles complexes, telles que des scènes routières perçues par un conducteur d'un véhicule automobile. Cet effet d'EM est robuste (les feedbacks donnés aux observateurs visant à les informer de cet effet, et à le prévenir, n'ont guère d'effet, cf. Courtney & Hubbard, 2008).

Les résultats des recherches que nous avons mentionnées montrent que l'EM peut être modulée par des facteurs de nature très diverse, tels que les caractéristiques liées aux propriétés physiques du mouvement de la cible, les caractéristiques liées au contexte dans lequel évolue la cible, et les caractéristiques cognitives de l'observateur liées à sa familiarité avec les scènes dynamiques perçues.

Les caractéristiques physiques du mouvement de la cible – ce sont celles qui ont jusqu'alors été les plus étudiées – jouent un rôle sur l'ampleur

de l'effet d'anticipation observé : par exemple, la vitesse de la cible, son accélération ou sa décélération. . . Le système cognitif serait ainsi à même de représenter la dynamique d'une cible sur la base d'un modèle cognitif reflétant certaines de ses propriétés physiques. L'EM peut aussi être modulée par certaines caractéristiques du contexte environnant la cible ou la scène en mouvement. Ainsi, selon que la cible en mouvement est entourée d'objets qui se déplacent dans le même sens que la cible, ou non, l'EM peut être soit augmentée, soit diminuée. De plus, dans les scènes naturelles notamment, la prise en compte du déplacement dans la profondeur du champ (dans le sens d'un agrandissement ou d'une diminution du champ visuel) joue également un rôle important dans l'ampleur de l'EM.

Les caractéristiques cognitives de l'observateur jouent également un rôle important dans la modulation de l'EM. C'est ce point qui a jusqu'alors été le moins étudié. Par exemple, les processus attentionnels développés par l'observateur permettent aussi de moduler l'ampleur de l'EM observée. Quand l'attention de l'observateur est focalisée sur la cible en mouvement et son point d'arrêt, l'EM diminue, l'attention visuelle permettant de stopper les processus d'extrapolation mentale. Mais si l'attention allouée à la trajectoire de la cible diminue lorsque la cible a disparu, par exemple en présence de distracteurs dans l'environnement, l'EM peut aussi diminuer. Enfin, les connaissances de l'observateur, son expérience, ou son expertise, vis-à-vis des scènes dynamiques perçues, jouent également un rôle modulateur très important dans l'ampleur de l'EM. Le rôle des connaissances de l'observateur a été jusqu'alors assez peu étudié. Des recherches montrent cependant le rôle des attentes de l'observateur sur la trajectoire de la cible. Le système visuel peut ainsi considérer à la fois des régularités locales du mouvement (le sens du mouvement lors des dernières ms) mais aussi plus globales (par ex., lorsque le mouvement change de sens périodiquement sur une échelle de temps de plusieurs secondes). Les connaissances a priori qu'ont les observateurs sur les lois physiques qui régissent les scènes dynamiques perçues jouent également un rôle modulateur de l'EM. De telles connaissances, implicites et pragmatiques, acquises progressivement avec l'expérience, sont le plus souvent suffisantes pour la gestion des situations rencontrées. Ceci nous a amenés à mettre l'accent sur les interactions qu'entretiennent les observateurs avec les scènes dynamiques qu'ils perçoivent, notamment en ce qui concerne les décisions d'action qu'ils peuvent être amenés à prendre. En effet, dans la vie quotidienne, nous sommes rarement passifs vis-à-vis des scènes dynamiques perçues. Par exemple, en situation de conduite automobile, le dynamisme des scènes perçues doit être relié aux actions à réaliser, freiner, accélérer, doubler. . . Certaines recherches sur l'expertise montrent que les

processus d'anticipation se développent progressivement, permettant la mise en œuvre de conduites de plus en plus adaptées à l'environnement. Perception et action apparaissent dans ce cadre intrinsèquement liées.

Il apparaît ainsi, qu'un modèle de l'extrapolation du mouvement doit pouvoir intégrer à la fois des processus perceptifs, des plans d'action et des processus de haut niveau. Un tel modèle général de l'extrapolation du mouvement n'existe pas à ce jour dans le champ spécifique des travaux sur l'EM. Nous présenterons succinctement deux théories qui apportent une contribution intéressante en vue de l'élaboration d'un tel modèle. La théorie de la simulation motrice de Jeannerod (par ex. Gallager, Jeannerod, 2002) offre un apport intéressant car elle intègre à fois des connaissances visuo-motrices et visuo-cognitives. En effet, dans ce cadre, l'information sensorielle visuelle est soumise à deux types de processus distincts : un processus qui mène aux actions motrices (Jeannerod, Arbib, Rizzolatti, & Sakata, 1995) et un processus qui mène à la reconnaissance et à l'identification des objets (Goodale & Milner, 1992). Cette théorie permet d'interpréter les résultats de la littérature impliquant action motrice et extrapolation du mouvement. Ces résultats suggèrent en effet que les informations motrices (produites par l'action de mouvoir l'objet) et les informations visuo-cognitives peuvent être imbriquées certains résultats allant dans dans l'élaboration de l'extrapolation du mouvement. De plus, comme l'énonce clairement la théorie de Jeannerod, le système visuo-cognitif est à même de simuler une action sans pour autant la réaliser effectivement (Frak, Paulignan, & Jeannerod, 2001). Blättler, Ferrari, Didierjean, et Marmèche (soumis) obtiennent des résultats allant dans le même sens. Dans une tâche d'extrapolation relative à des scènes naturelles de conduite automobile, des sujets simulant l'action de conduire (avec un volant dans les mains) extrapolent davantage le mouvement de la scène que des sujets de même niveau d'expérience qui ne simulent pas l'action de conduire. Si la théorie de la simulation motrice semble bien s'adapter aux résultats concernant l'extrapolation du mouvement, elle ne précise sans doute pas suffisamment quelles sont les structures de représentation qui correspondent aux événements perçus, et comment celles-ci évoluent avec l'apprentissage ou l'expertise.

La *Theory of Event Coding* (TEC) apporte un éclairage théorique qui nous semble complémentaire de celui développé par Jeannerod et coll. La TEC propose que les contenus perceptifs des scènes visuelles, et les plans d'action qui peuvent être associés, sont encodés dans des structures de représentation communes (Hommel, Müssler, Aschersleben, & Prinz, 2001). La TEC suggère un partage entre des processus conduisant aux actions motrices et des processus conduisant à la formation des

représentations. Ainsi, un événement perceptif conduirait à la création d'un « fichier » de cet événement (Hommel, 2004). Ce fichier, contenant diverses informations de l'événement en question, serait transitoire. Il serait constitué d'un réseau liant temporairement les codes de l'événement (c.-à-d., les informations liées à cet événement) avec les actions subséquentes et avec le contexte actuel. Ainsi, les schémas d'actions (ou modèles internes voir Zago & Lacquaniti, 2005) relatifs à un environnement donné pourraient enrichir les traces mnésiques provenant des événements perçus. Les individus ayant plus d'expérience dans un domaine particulier auraient de fait une plus grande probabilité d'enrichir les informations sensorielles provenant de ce domaine. L'originalité de cette théorie est d'intégrer d'emblée perception et action et de poser directement la question de l'évolution des structures de représentation avec la familiarité des observateurs vis-à-vis des scènes dynamiques perçues, leur expérience ou leur expertise. Autrement dit, la question fondamentale qui est posée est celle de la sélection des indices qui sont pertinents dans les scènes visuelles perçues pour réaliser les tâches perceptives requises, plus ou moins reliées aux actions ou décisions à prendre étant donné le contexte. La TEC propose des pistes de recherche intéressantes, mais n'est pas encore vraiment opérationnelle, les unités de représentation permettant l'encodage des scènes dynamiques n'étant pas clairement définies, pas plus que les mécanismes d'évolution. Il reste donc à préciser quelles sont les structures de représentation communes à l'analyse des scènes visuelles, et celles qui sont spécifiques à chaque type de scène, en relation avec l'expérience des observateurs vis-à-vis de ces scènes. L'analyse des mouvements oculaires des observateurs, associée aux paradigmes concernant l'expertise, apporterait certainement des données importantes relativement au type d'encodage des scènes effectué par les observateurs, relié en particulier à l'enjeu de la perception, plus ou moins passive ou plus ou moins active, en liaison étroite avec les actions potentielles à réaliser.

Dans cette voie, l'implication des mouvements oculaires dans l'EM a fait l'objet d'un débat entre Kerzel (2006) et Hubbard (2005, 2006t). Il ressort de cet échange que, dans un protocole de poursuite oculaire (par ex., Hubbard & Barhucha, 1988), les mouvements oculaires produits ne peuvent pas être stoppés instantanément et qu'ils perdurent environ 300 ms (Mitrani et Dimitrov, 1978). De ce fait, la fovéa est déplacée dans le sens du mouvement et pourrait être la cause de l'erreur spatio-cognitive observée dans les recherches concernant l'EM. À ce propos, Kerzel (2006) cite plusieurs recherches qui montrent une élimination de l'EM lorsque les sujets ne suivent pas le mouvement de la cible avec les yeux (Baldo, Kihara, Namba, & Klein, 2002 ; Kerzel, 2000 ; Kerzel, Jordan, & Musseler, 2001 ; Whitney & Cavanagh, 2002 ; Whitney, Murakami, & Cavanagh, 2000). Ainsi, il semble que le positionnement oculaire, qui renvoie à des

connaissances visuo-motrices (par ex., les coordonnées de positionnement de l'œil) soit très important dans l'élaboration de l'EM. Cependant, il n'est pas possible de réduire l'EM à un ensemble de processus visuo-moteurs parce que les mouvements oculaires reflètent aussi des processus de haut niveau, notamment les attentes de l'observateur à propos de la trajectoire d'une cible (Krauzlis & Stone, 1999). Ceci renforce encore l'hypothèse selon laquelle l'extrapolation du mouvement pourrait reposer sur un modèle composite intégrant à la fois des processus de haut niveau et de bas niveau.

Au terme de cet article, nous sommes bien évidemment amenés à souligner la complexité des processus qui contribuent à l'extrapolation du mouvement, notamment dans des scènes dynamiques. L'extrapolation du mouvement est un processus très adaptatif puisqu'il est effectif dans des situations dont l'échelle temporelle est courte (perception-action) mais aussi plus longue (l'EM considère l'histoire du mouvement perçu sur une échelle plus longue que celle des millisecondes). De plus, l'EM évolue ontogénétiquement puisque les connaissances spécifiques reliées à des situations régulièrement rencontrées modulent ce processus. S'il est difficile de construire un modèle très fin qui rendrait compte de l'extrapolation du mouvement, un tel modèle devrait en tout cas considérer l'intrication de facteurs physiques, contextuels et cognitifs ; il devrait aussi rendre compte de l'encodage, le plus optimal possible, des scènes perçues, compte tenu des visées de l'observateur.

Reçu le 23 septembre 2010.

Révision acceptée le 14 novembre 2011.

BIBLIOGRAPHIE

- Baldo, M. V., Kihara, A. H., Namba, J., & Klein, S. A. (2002). Evidence for an attentional component of the perceptual misalignment between moving and flashing stimuli. *Perception, 31*, 17-30.
- Bertamini, M. (1993). Memory for position and dynamic representations. *Memory & Cognition, 21*, 449-457.
- Bharucha, J. J., & Hubbard, T. L. (1992). *Anticipated collision along an oblique path: Effects on judged displacement*. Unpublished manuscript
- Blättler, C., Ferrari, V., Didierjean, A., & Marmèche, E. (soumis). Role of expertise and action in motion extrapolation in real road scenes.
- Blättler, C., Ferrari, V., Didierjean, A., Van Elslande, P., & Marmèche, E. (2010). Can expertise modulate Representational Momentum. *Visual Cognition, 18*, 1253-1273
- Blättler, C., Ferrari, V., Didierjean, A., & Marmèche, E. (2011). Representational Momentum in aviation. *Journal of*

- Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 37, 1569-1577.
- Bryant, D. J., & Subbiah, I. (1994). Subjective landmarks in perception and memory for spatial location. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 48, 119-139.
- Chase, W. G., & Simon, H. A. (1973). Perception in Chess. *Cognitive Psychology*, 4, 55-81.
- Courtney, J. R., & Hubbard, T. L. (2008). Spatial memory and explicit knowledge : an effect of instruction on representational momentum. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 1778-1784.
- DeLucia, P. R., & Mardia, M. M. (2006). Visual memory for moving scenes. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59, 340-360.
- Didierjean, A., Ferrari, V., & Marmèche, E. (2004). L'expertise cognitive au jeu d'échecs : quoi de neuf depuis de Groot (1946) ? *L'Année Psychologique*, 104, 771-793.
- Didierjean, A., & Gobet, F. (2008). Sherlock Holmes—An expert's view of expertise. *British Journal of Psychology*, 99, 109-125.
- Didierjean, A., & Marmèche, E. (2005). Anticipatory representation of visual basketball scenes by novice and expert players. *Visual Cognition*, 12, 265-283.
- Ferrari, V., Didierjean, A., & Marmèche, E. (2006). Dynamic perception in chess. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59, 397-410.
- Ferrari, V., Didierjean, A., & Marmèche, E. (2008). Effect of expertise acquisition on strategic perception: The example of chess. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61, 1265-1280.
- Finke, R. A., & Freyd, J. J. (1985). Transformations of visual memory induced by implied motions of pattern elements. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 11, 780-794.
- Finke, R. A., Freyd, J. J., & Shyi, G. C. (1986). Implied velocity and acceleration induce transformations of visual memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 115, 175-188.
- Finke, R. A., & Shyi, G. C. (1988). Mental extrapolation and representational momentum for complex implied motions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 14, 112-120.
- Fodor, J. A., (1983). *The modularity of mind: An essay on faculty psychology*. Cambridge, MA, MIT Press.
- Frak, V. G., Paulignan, Y., & Jeannerod, M. (2001) Orientation of the opposition axis in mentally simulated grasping. *Experimental Brain Research*, 136, 120-127.
- Freyd, J. J. (1983). The mental representation of movement when static stimuli are viewed. *Perception & Psychophysics*, 33, 575-581.
- Freyd, J. J. (1987). Dynamic mental representation. *Psychological Review*, 94, 427-438.
- Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1984). Representational Momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 126-132.
- Freyd, J. J., & Finke, R. A. (1985). A velocity effect of representational momentum. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 23, 443-446.
- Freyd, J. J., & Johnson, J. Q. (1987). Probing the time course of representational momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 259-268.
- Freyd, J. J., & Jones, K. T. (1994). Representational momentum for a spiral path. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 20, 968-976.
- Freyd, J. J., Pantzer, T. M., & Cheng, J. L. (1988). Representing statics as forces in equilibrium. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117, 395-407.
- Futterweit, L. R., & Beilin, H. (1994). Recognition memory for movement in

- photographs: a developmental study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 57, 163-179.
- Gallagher, S., & Jeannerod, M. (2002). From action to interaction. *Journal of Consciousness Studies*, 9, 3-26.
- Getzmann, S., Lewald, J., & Guski, R. (2004). Representational momentum in spatial hearing. *Perception*, 33, 591-599.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. London: George Allen & Unwin LTD.
- Gobet, F., & Simon, H. A. (1996). Templates in chess memory: a mechanism for recalling several boards. *Cognitive Psychology*, 31, 1-40.
- Goodale, M. A., & Milner, A. D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15, 20-25.
- Hayes, A. E., & Freyd, J. J. (2002). Representational momentum when attention is divided. *Visual Cognition*, 9, 8-27.
- Hayes, A. E., Sacher, G., Thornton, I. M., Sereno, M. E., & Freyd, J. J. (1996). Representational momentum in depth using stereopsis [ARVO Abstract 2120]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 37(Suppl. 3), S467.
- Hommel, B. (2004). Event files: feature binding in and across perception and action. *Trends in Cognitive Sciences*, 8, 494-500.
- Hommel, B., Musseler, J., Aschersleben, G., & Prinz, W. (2001). The Theory of Event Coding (TEC): a framework for perception and action planning. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 849-937.
- Hubbard, T. L. (1990). Cognitive representation of linear motion: possible direction and gravity effects in judged displacement. *Memory & Cognition*, 18, 299-309.
- Hubbard, T. L. (1993). The effect of context on visual representational momentum. *Memory & Cognition*, 21, 103-114.
- Hubbard, T. L. (1995a). Cognitive representation of motion: evidence for friction and gravity analogues. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 21, 241-254.
- Hubbard, T. L. (1995b). Environmental invariants in the representation of motion: Implied dynamics and representational momentum, gravity, friction, and centripetal forces. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2, 322-338.
- Hubbard, T. L. (1996). Displacement in depth: representational momentum and boundary extension. *Psychological Research*, 59, 33-47.
- Hubbard, T. L. (1997). Target size and displacement along the axis of implied gravitational attraction : Effects of implied weight and evidence of representational gravity. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 23, 1484-1493.
- Hubbard, T. L. (1998). Some effects of representational friction, target size, and memory averaging on memory for vertically moving targets. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 52, 44-49.
- Hubbard, T. L. (2001). The effect of height in the picture plane on the forward displacement of ascending and descending targets. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 55, 325-329.
- Hubbard, T. L. (2005). Representational momentum and related displacements in spatial memory: A review of the findings. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12, 822-851.
- Hubbard, T. L. (2006). Computational theory and cognition in representational momentum and related types of displacement: A reply to Kerzel. *Psychonomic Bulletin & Review*, 13, 174-177.
- Hubbard, T. L., & Bharucha, J. J. (1988). Judged displacement in apparent vertical and horizontal motion. *Perception & Psychophysics*, 44, 211-221.
- Hubbard, T. L., Kumar, A. M., & Carp, C. L. (2009). Effects of spatial cueing on representational momentum. *Journal of*

- Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35, 666-677.
- Hubbard, T. L., & Ruppel, S. E. (1999). Representational Momentum and the Landmark Attraction Effect. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 53, 242-256.
- Hubbard, T. L., & Ruppel, S. E. (2000). Spatial memory averaging, the landmark attraction effect, and representational gravity. *Psychological Research*, 64, 41-55.
- Jeannerod, M., Arbib, M. A., Rizzolatti, G., & Sakata, H. (1995). Grasping objects: The cortical mechanisms of visuomotor transformation. *Trends in Neurosciences*, 18, 314-320.
- Johnston, H. M., & Jones, M. R. (2006). Higher Order Pattern Structure Influences Auditory Representational Momentum. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32, 2-17.
- Jones, M. R. (1981). A tutorial on some issues and methods in serial pattern research. *Perception & Psychophysics*, 30, 492-504.
- Joordens, S., Spalek, T. M., Razmy, S., & van Duijn, M. (2004). A clockwork orange: compensation opposing momentum in memory for location. *Memory & Cognition*, 32, 39-50.
- 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. (2002). A matter of design: No representational momentum without predictability. *Visual Cognition*, 9, 66-80.
- Kerzel, D. (2003). Attention maintains mental extrapolation of target position: irrelevant distractors eliminate forward displacement after implied motion. *Cognition*, 88, 109-131.
- Kerzel, D. (2006). Why eye movements and perceptual factors have to be controlled in studies on "representational momentum". *Psychonomic Bulletin & Review*, 13, 166-173; discussion 174-167.
- Kerzel, D., Jordan, J. S., & Musseler, 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.
- Kozhevnikov, M., & Hegarty, M. (2001). Impetus beliefs as default heuristics: dissociation between explicit and implicit knowledge about motion. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 439-453.
- Land, M. F., & McLeod, P. (2000). From eye movements to actions: how batsmen hit the ball. *Nature Neuroscience*, 3, 1340-1345.
- McIntyre, J., Zago, M., Berthoz, A., & Lacquaniti, F. (2001). Does the brain model Newton's laws? *Nature Neuroscience*, 4, 693-694.
- McNamara, T. P., & Diwadkar, V. A. (1997). Symmetry and asymmetry of human spatial memory. *Cognitive Psychology*, 34, 160-190.
- Mitrani, L., & Dimitrov, G. (1978). Pursuit eye movements of a disappearing moving target. *Vision Research*, 18, 537-539.
- Munger, M. P., Solberg, J. L., & Horrocks, K. K. (1999). The relationship between mental rotation and representational momentum. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 25, 1557-1568.
- Nagai, M., & Yagi, A. (2001). The pointedness effect on representational momentum. *Memory & Cognition*, 29, 91-99.
- Posner, M. I. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 3-25.
- Reed, C. L., & Vinson, N. G. (1996). Conceptual effects on representational momentum. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 22, 839-850.
- Reingold, E. M., Charness, N., Pomplun, M., & Stampe, D. M. (2001). Visual span in expert chess players: evidence from eye movements. *Psychological Science*, 12, 48-55.

- Restle, F. (1970). Theory of serial pattern learning: structural trees. *Psychological Review*, 77, 481-495.
- Ruppel, S. E., Fleming, C. N., & Hubbard, T. L. (2009). Representational momentum is not (totally) impervious to error feedback. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 63, 49-58.
- Sadella, E., Staplin, L. J., & Burrough, W. J. (1979). Retrieval Processes in Distance Cognition. *Memory & Cognition*, 7, 291-296.
- Shepard, R.N. (1984). Ecological constraints on internal representation: Resonant kinematics of perceiving, imagining, thinking, and dreaming. *Psychological Review*, 91, 417-447.
- Thornton, I. M., & Hayes, A. E. (2004). Anticipating action in complex scenes. *Visual Cognition*, 11, 341-370.
- Tversky, B., & Schiano, D. J. (1989). Perceptual and conceptual factors in distortions in memory for graphs and maps. *Journal of Experimental Psychology: General*, 118, 387-398.
- Verfaillie, K., & d'Ydewalle, G. (1991). Representational momentum and event course anticipation in the perception of implied periodical motions. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 302-313.
- Vinson, N. G., & Reed, C. L. (2002). Sources of object-specific effects in representational momentum. *Visual Cognition*, 9, 41-65.
- Whitney, D., & Cavanagh, P. (2002). Surrounding motion affects the perceived locations of moving stimuli. *Visual Cognition*, 9, 131-152.
- Whitney, D., Murakami, I., & Cavanagh, P. (2000). Illusory spatial offset of a flash relative to a moving stimulus is caused by differential latencies for moving and flashed stimuli. *Vision Research*, 40, 137-149.
- Wulf, G., & Prinz, W. (2001). Directing attention to movement effects enhances learning: a review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8, 648-660.
- Zago, M., & Lacquaniti, F. (2005). Cognitive, perceptual and action-oriented representations of falling objects. *Neuropsychologia*, 43, 178-188.

