

Expressions comportementales du couplage Information-Mouvement

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

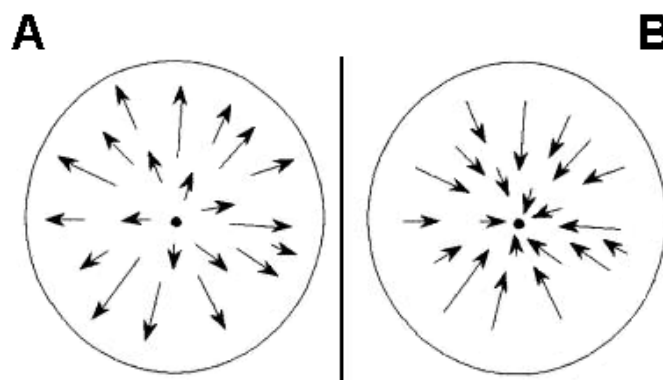


Figure 12 : Représentation schématique des patrons optiques obtenus lors d'oscillations dans le sens Antéro-Postérieur. (A) Le point représente le focus d'expansion optique qui correspond au point de fuite des vecteurs. Ce patron optique informe l'agent d'un mouvement vers l'avant. (B) Le point représente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

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

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

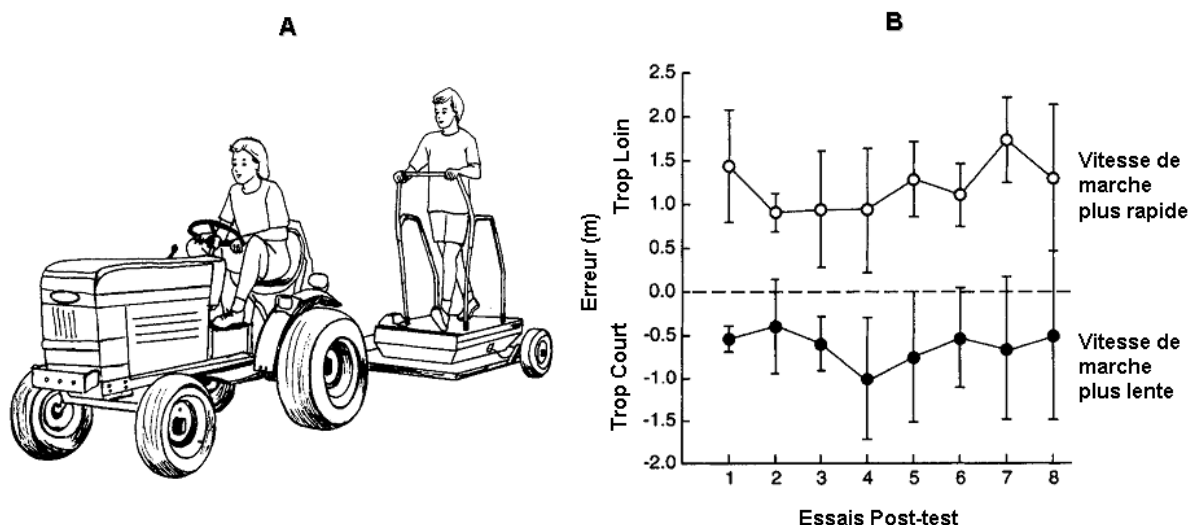


Figure 13: (A) Représentation schématique du dispositif utilisé. Un participant marchait sur un tapis roulant qui était tiré par un tracteur à une vitesse différente afin de fausser la vitesse optique du déplacement locomoteur. Après plusieurs minutes, il était demandé aux participants de marcher vers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

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

3.3. Les Loïs de contrôle

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

3.3.1. Définition, fonctionnement et caractéristiques des lois de contrôle

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

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

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

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

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

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

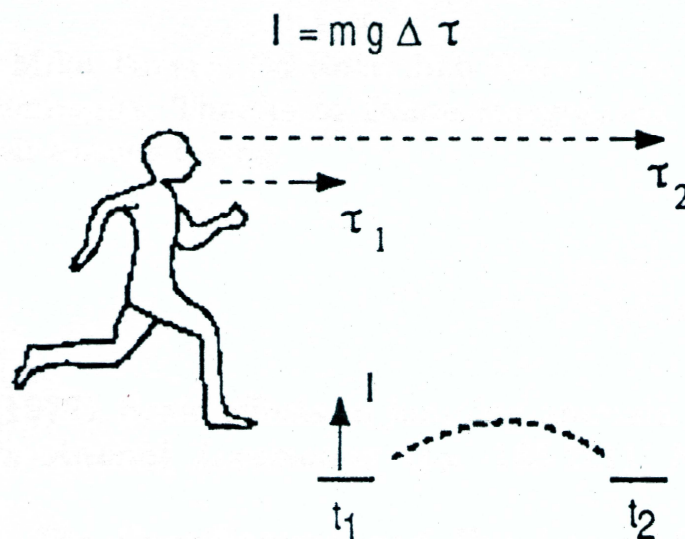


Figure 14 : Illustration de la loi de contrôle proposée par Warren et al. (1986) pour expliquer le contrôle de pointages locomoteurs successifs. D'après cette loi de contrôle, l'impulsion verticale (I) est fonction du différentiel de *tau* ($\tau_2 - \tau_1$) référé à deux cibles successives (d'après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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

3.3.2. Les tâches d'interception

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

3.3.2.1. La loi de contrôle Vitesse Requisite

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

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

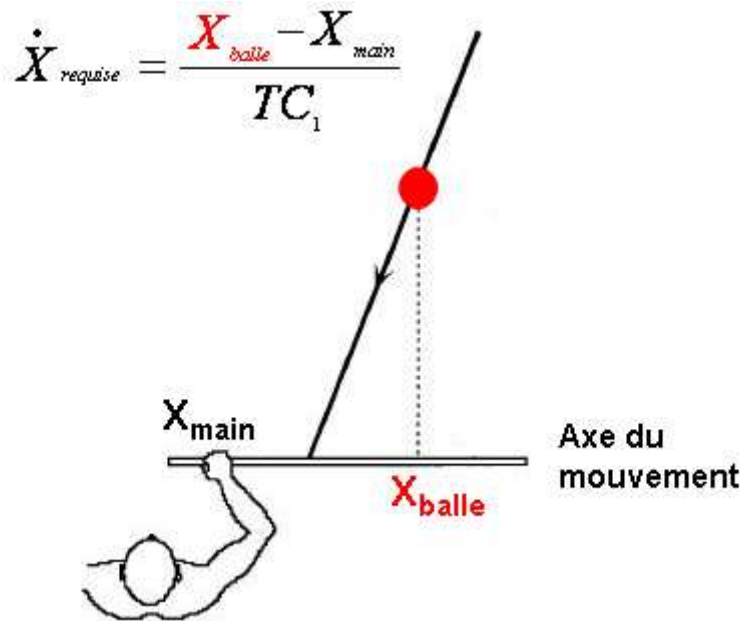


Figure 15 : Représentation schématique d'une tâche de capture de balle uni-manuelle dans laquelle le mouvement de la main est contraint selon un axe de mouvement transversal. Selon Peper et al. (1994), les participants régulent la vitesse de leur main afin d'atteindre la Vitesse Requise de la main (\dot{X}_{requis})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

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

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

avec

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

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

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

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

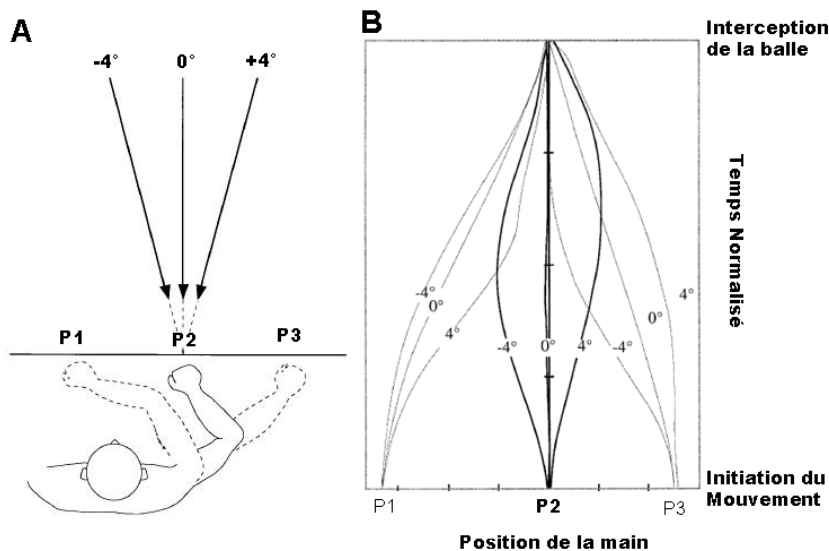


Figure 16 : (A) Illustration des différentes manipulations expérimentales permettant d'induire un décalage entre le comportement requis et le comportement courant. Montagne et al. (1999) ont proposé trois positions initiales de la main correspondant à un placement à gauche du point d'interception (P1),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

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

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

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

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

où

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

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

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

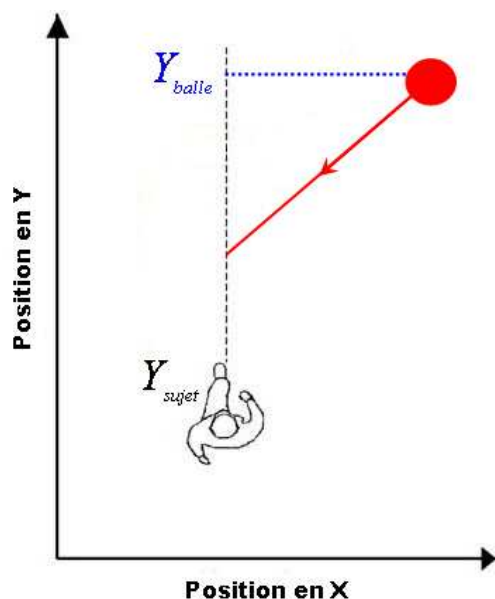


Figure 17 : Vue aérienne de la tâche d'interception utilisée par Chardenon et al. (2002). Le sujet doit intercepter une balle mobile en produisant un déplacement vers l'avant le long de l'axe Y. Le modèle vitesse requise reformulé par Chardenon et al. (2002) prend en compte la projection orthogonale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

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

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

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

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

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

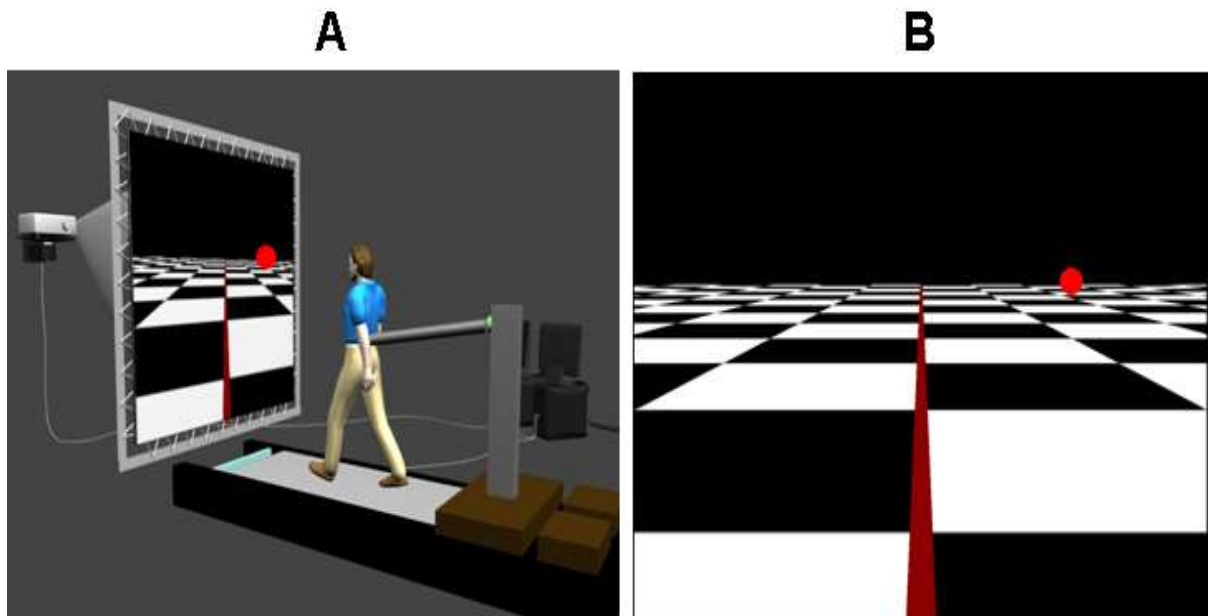


Figure 18: Illustration du dispositif de réalité virtuelle utilisé dans les études présentées par la suite. (A) Le dispositif était constitué d’un tapis roulant relié à l’environnement de telle sorte que les déplacements de l’environnement soient dépendants de ceux produits par le participant. (B) Exemple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

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

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

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

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

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

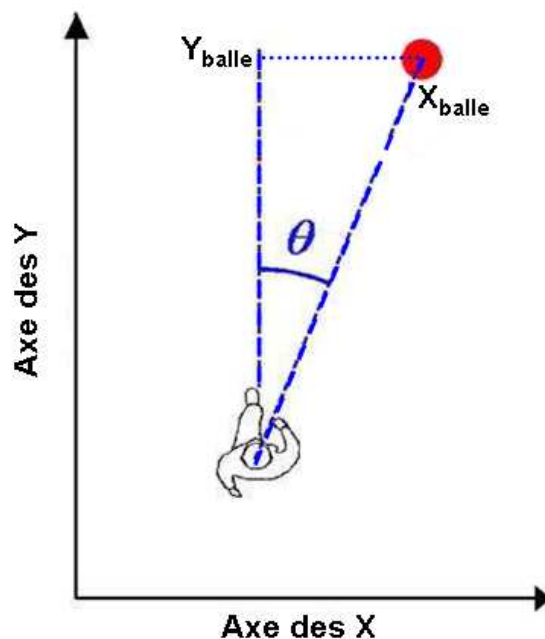


Figure 19 : Vue aérienne de l'angle de relèvement correspondant à l'angle sous-tendu au point d'observation par la position angulaire de la balle et la direction de déplacement de l'agent.

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

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

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

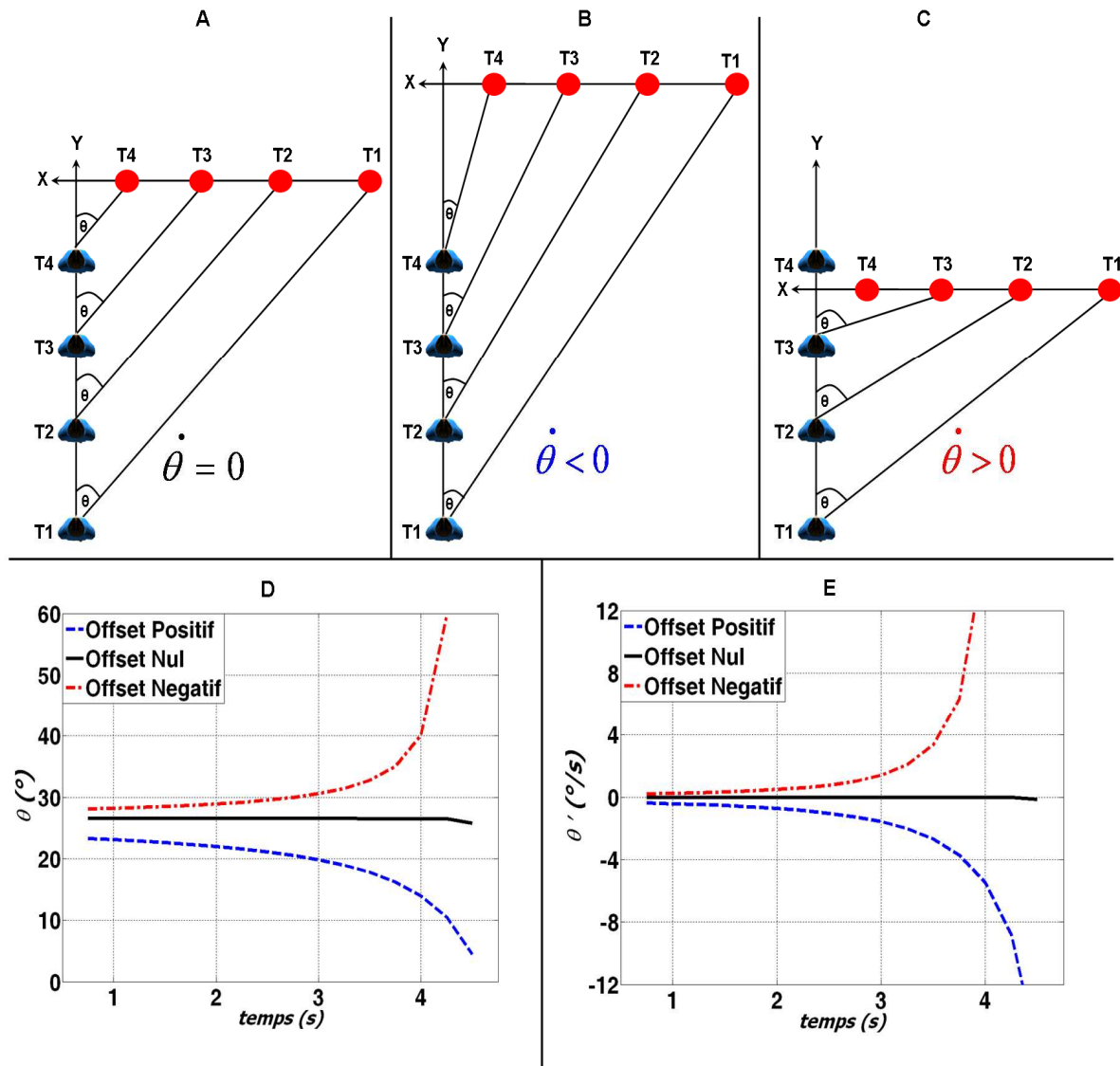


Figure 20 : Représentation schématique, en fonction de l'offset, du taux de changement de l'angle de relèvement ($\dot{\theta}$) au cours d'une tâche d'interception locomotrice dans laquelle l'agent se déplace selon l'axe Y et la balle selon l'axe des X. (A) Illustration de l'offset nul pour lequel l'agent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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

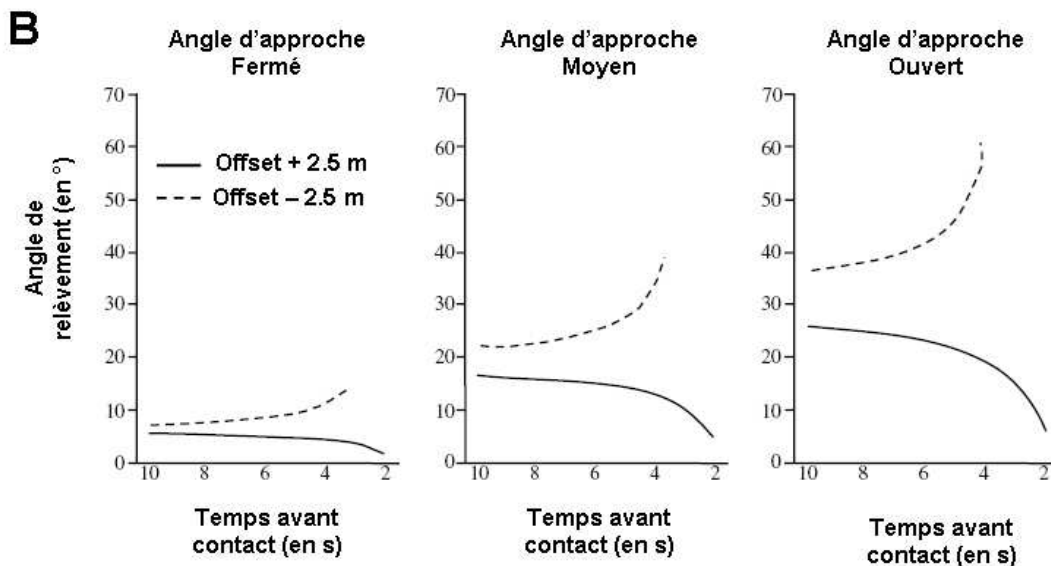
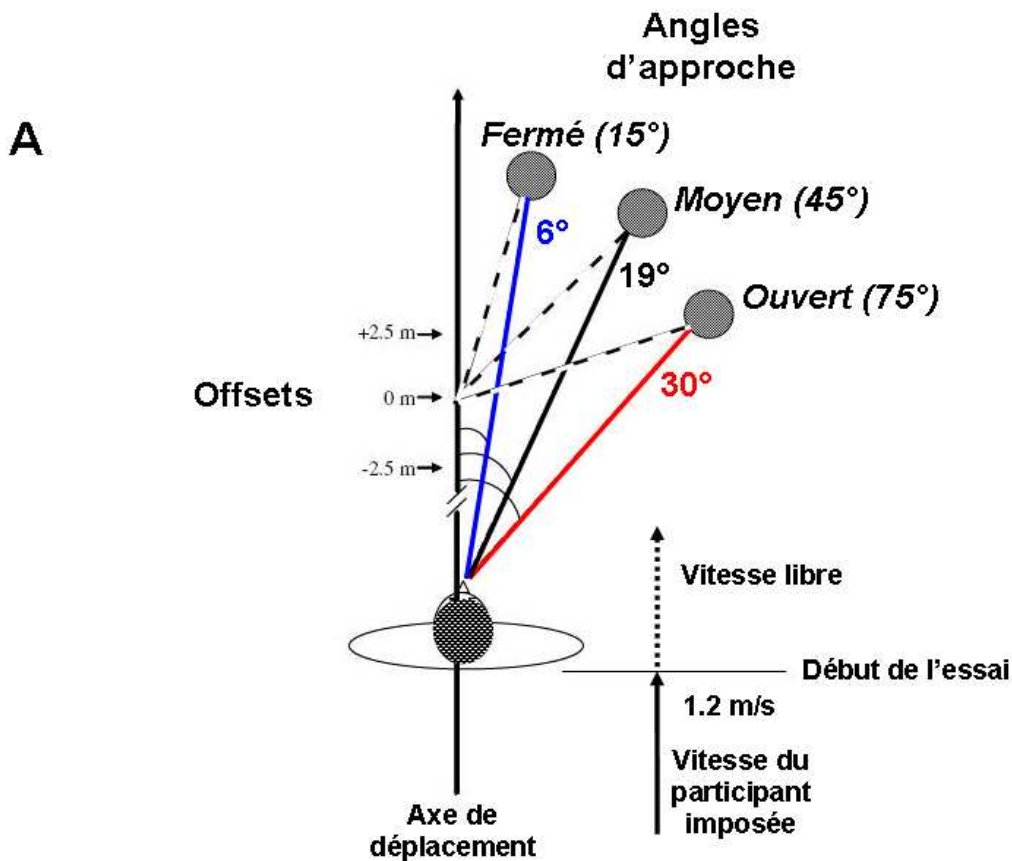


Figure 21: (A) Vue du dessus des différentes manipulations expérimentales de l'expérience 1 de Chardenon et al. (2005). Les auteurs ont proposé trois offsets (+2.5m, 0m et -2.5m). Pour chaque offset, les balles suivaient une trajectoire qui présentait un angle d'approche fermé (15°), moyen (45°) ou ouvert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

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

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

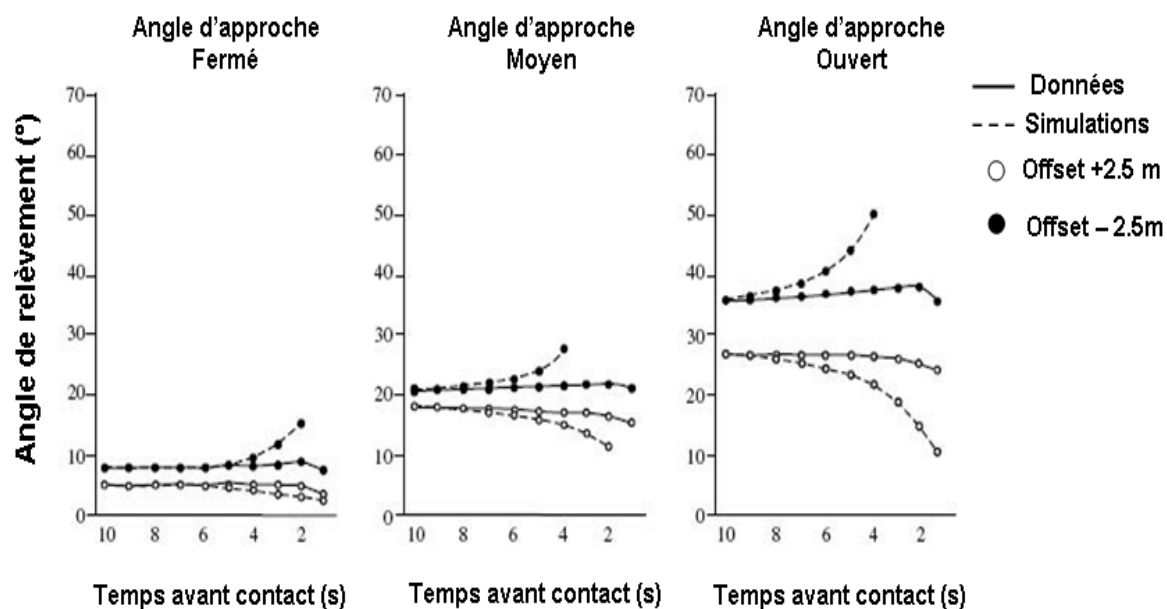


Figure 22 : Représentation, dans les différentes conditions d'angle d'approche et d'offsets (+2.5m et -2.5m), de l'angle de relèvement simulé (lignes en pointillés) dans le cas d'un maintien de la vitesse initiale et de l'angle de relèvement calculé sur la base des régulations motrices produites (lignes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

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

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

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

3.3.3.2.4. *Cas particulier des trajectoires courbées*

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

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

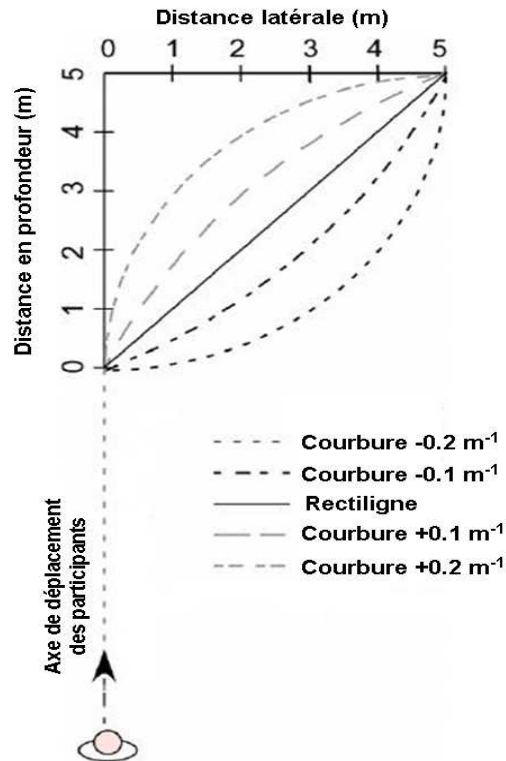


Figure 23 : Vue aérienne des cinq trajectoires de balles utilisées dans la condition d'offset nul. Pour un même point de départ et d'arrivée, les balles pouvaient suivre une trajectoire rectiligne (ligne pleine), deux trajectoires de courbure négative (concaves, représentées par les lignes en pointillés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

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

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

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

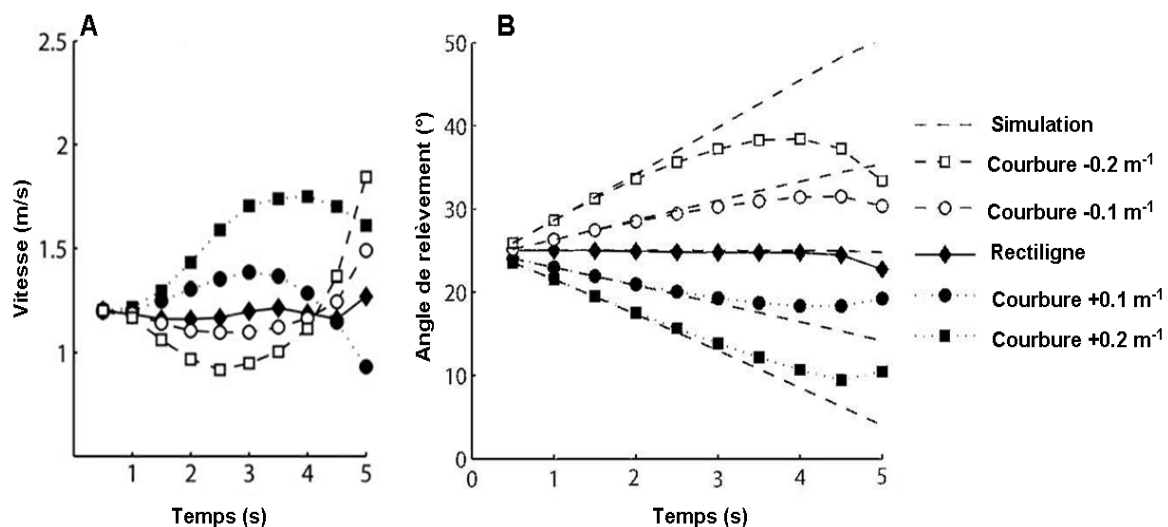


Figure 24 : (A) Evolution au cours du temps des vitesses produites par les participants dans les différentes conditions de trajectoire dans la condition d'offset 0 m. (B) Evolution au cours du temps de l'angle de relèvement simulé ainsi que l'évolution de l'angle de relèvement calculé sur la base des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

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

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

3.3.3.2.5. Différentes possibilités d'accéder à l'information

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

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

et

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

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

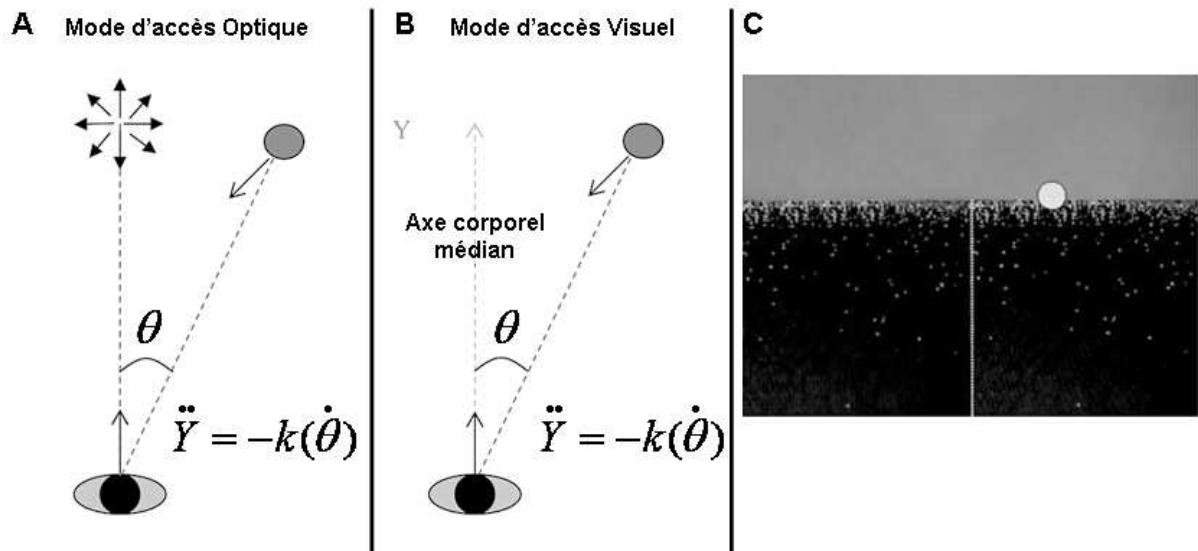


Figure 25 : Représentation schématique des deux modes d'accès au taux de changement de l'angle de relèvement testés par Chardenon et al. (2004) dans un environnement virtuel (C). (A) le mode d'accès optique consiste pour un agent à référer la position de la balle au FEO (θ). (B) le mode d'accès visuel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

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

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

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

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

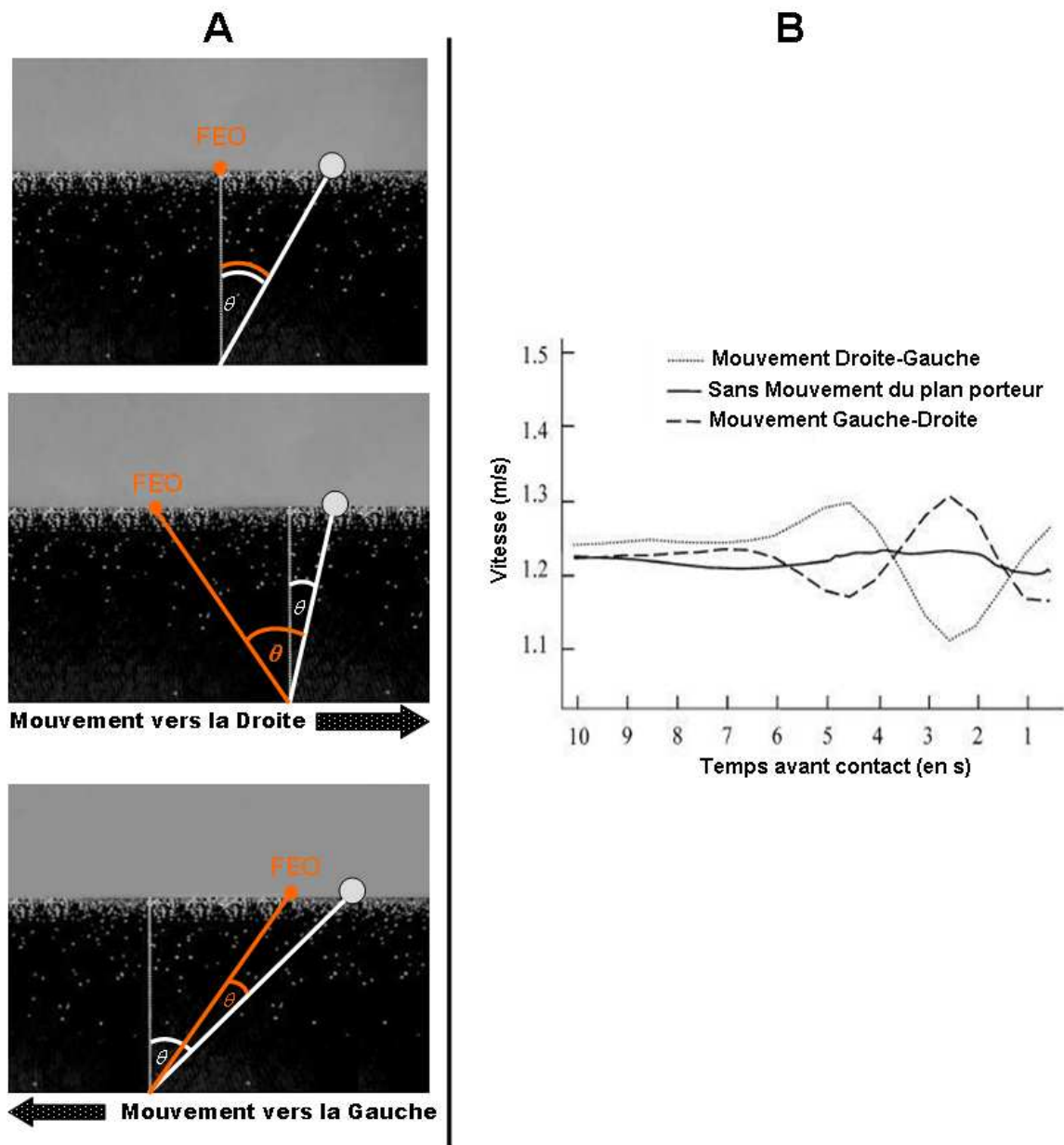


Figure 26 : (A) Illustration des effets des déplacements du plan porteur vers la droite puis vers la gauche. En position initiale (image du haut), le FEO (en orange) et la DE (en blanc) sont superposés et donnent accès au même angle de relèvement. Lorsque le plan porteur bouge vers la droite (image du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

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

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

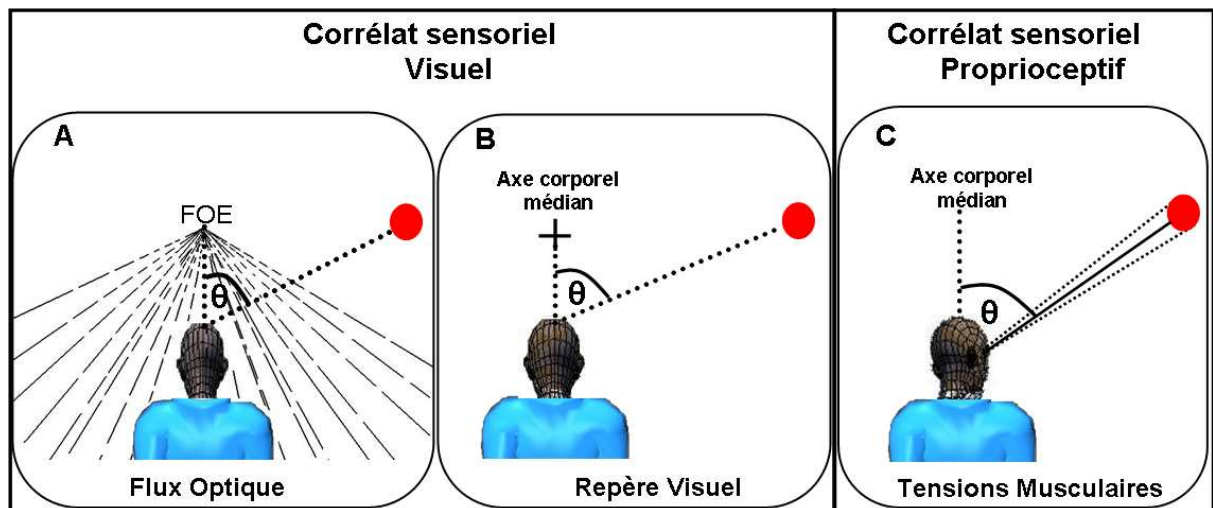


Figure 27 : Illustration des différents modes d'accès à l'angle de relèvement (θ) au travers de deux corrélats sensoriels distincts (la vision et la proprioception). Pour accéder à l'angle de relèvement, l'agent peut utiliser le mode d'accès proprioceptif (C) et/ou visuel (B) pour référer la position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

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

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

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

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

4. Problématique de la thèse

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

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

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

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