

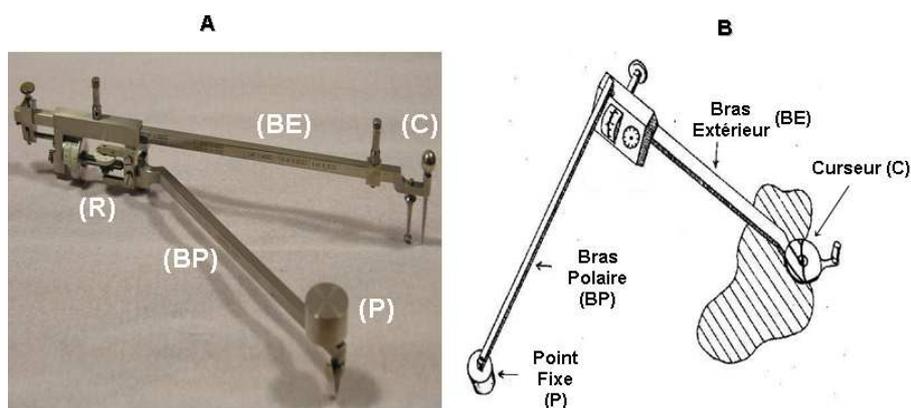
# ***Introduction à l'approche écologique de la perception et de l'action***

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

## **1.1. Les postulats fondateurs**

### **1.1.1. La Perception directe**

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



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

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

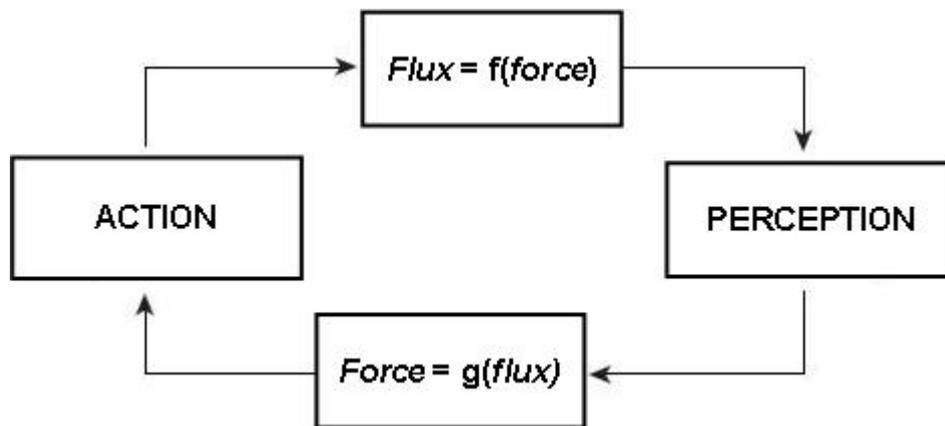
### **1.1.2. Le Système Agent-Environnement**

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

affordance<sup>1</sup>. Sur la base d'une affordance, une fois le mode d'action choisi, l'agent devra alors contrôler son action. Ce travail de thèse porte précisément sur les mécanismes perceptivo-moteurs qui sous-tendent le contrôle de l'action.

### 1.1.3. Le Cycle Perception-Action

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



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

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

---

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

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

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

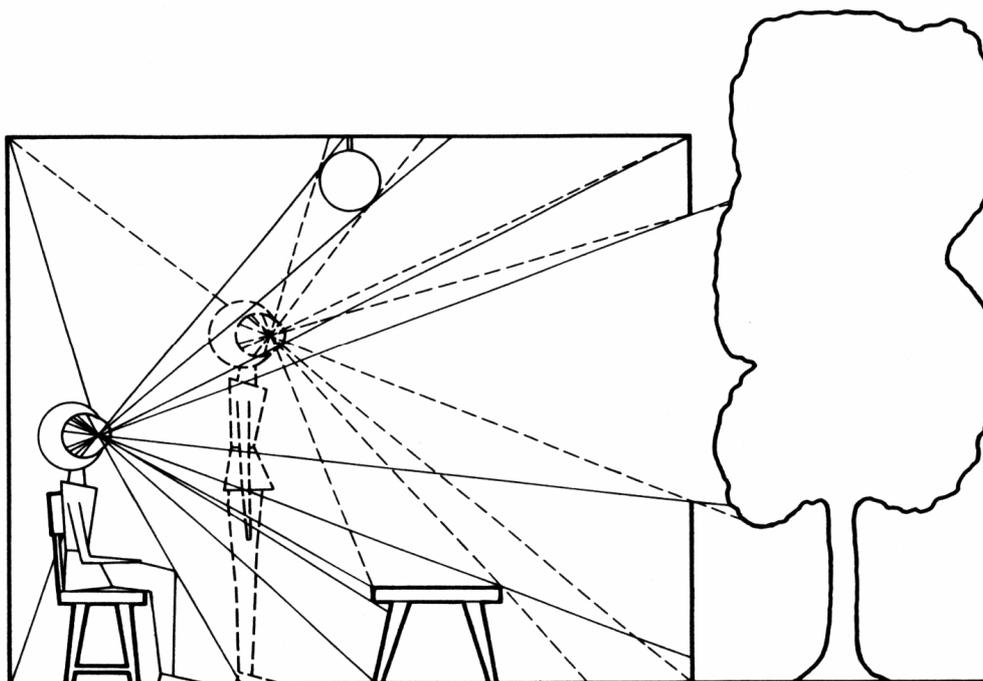
## **1.2. Présentation des concepts clés**

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

### 1.2.1. La Configuration optique

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

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



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

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

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

### 1.2.2. Le Flux optique

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



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

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

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

### 1.2.3. Les Invariants

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

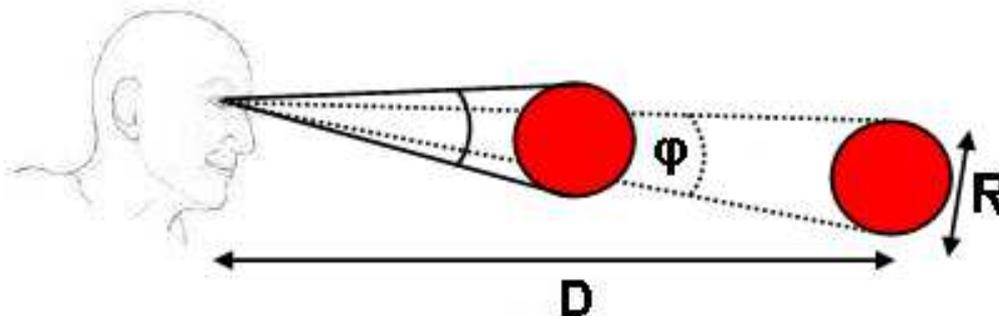
Le premier type d'invariant est lié aux caractéristiques de la structure de l'objet (i.e., la taille, la forme, la composition, etc). Ces invariants sont qualifiés d' « invariants structuraux » car ils renseignent l'agent sur la permanence de l'organisation des surfaces de l'environnement. Par exemple,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

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

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

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

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



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

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

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

#### 1.2.4. Les Informations

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

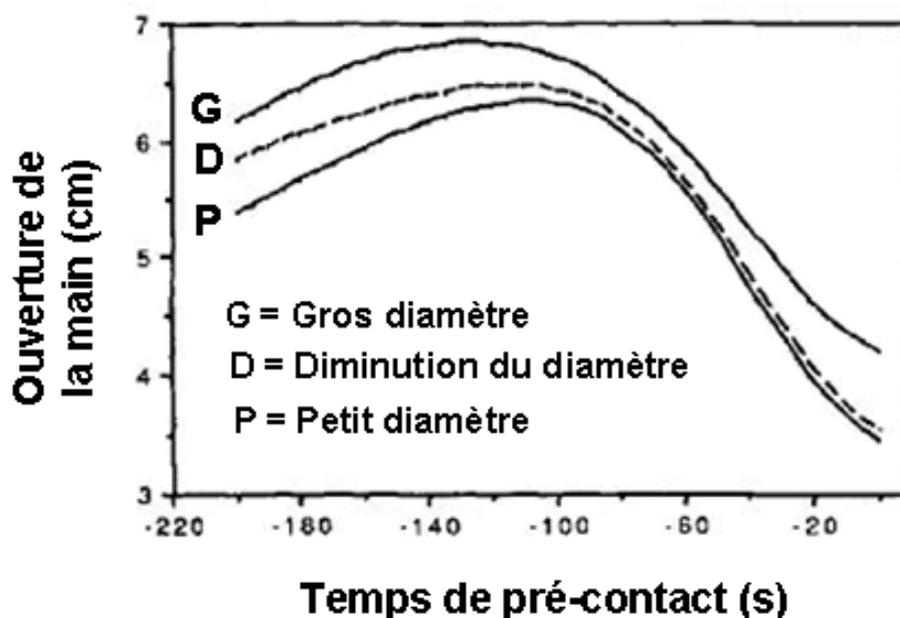


Figure 7 : Evolution de l'ouverture des mains des participants en fonction du temps restant avant le contact avec une balle de petit diamètre (P), une balle de diamètre plus large (L) et une balle dont le diamètre diminuait en cours d'approche (D). Au fur et à mesure que la taille de la balle change,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

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

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

## **2. Présentation d'invariants utiles au contrôle des déplacements**

### **2.1. Percevoir son déplacement**

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

#### **2.1.1. La direction de déplacement**

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

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

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

### 2.1.2. La vitesse de déplacement

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

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

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

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

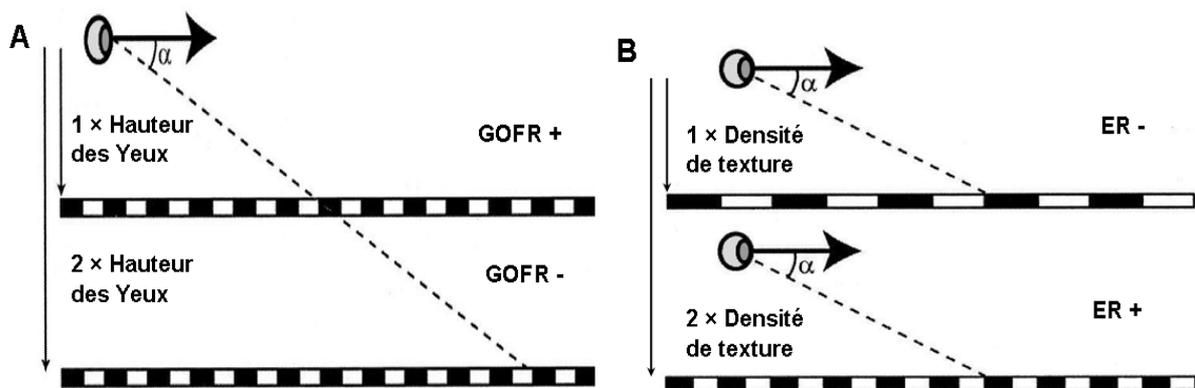
Cet invariant spécifie la vitesse de déplacement en unité de hauteur des yeux par unité de temps (Larish & Flach, 1990). De plus, *GOFR* varie directement avec la vitesse de déplacement et est inversement proportionnel à la hauteur des yeux (Figure 8A). En revanche, *GOFR* est indépendant de la densité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

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

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

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

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



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

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

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

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

### 3. Le couplage Perception-Action

#### 3.1. Les différents niveaux d'analyse

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

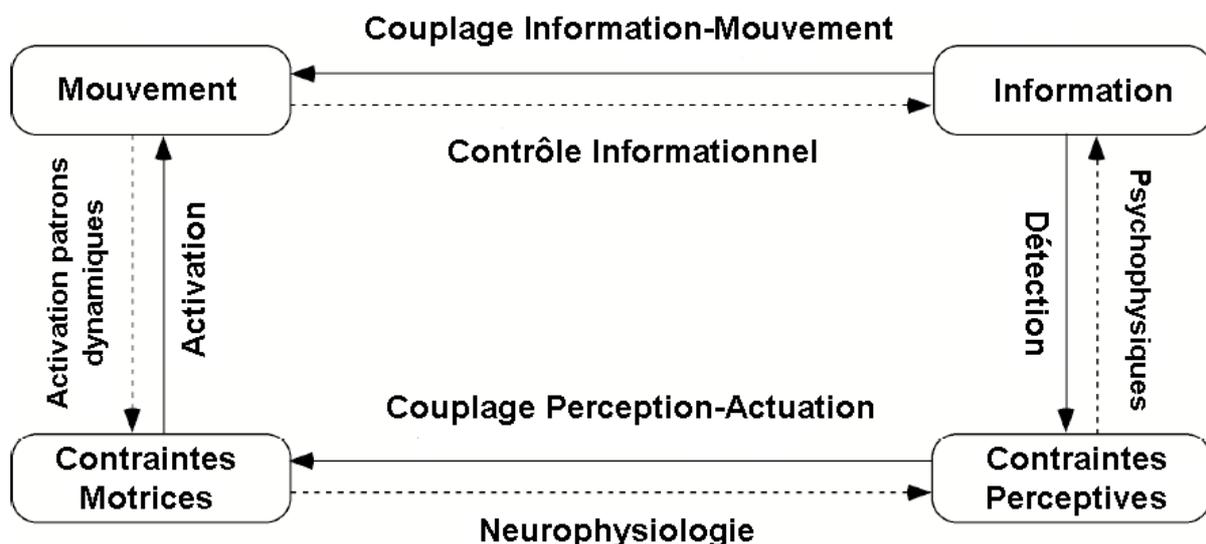


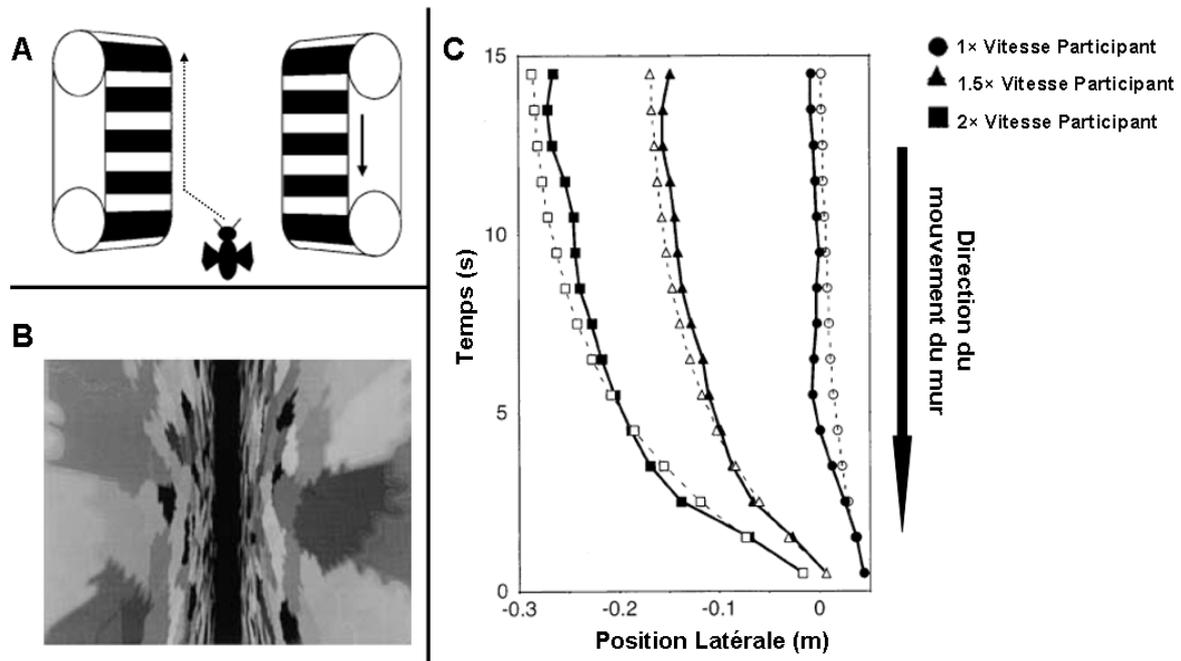
Figure 9: Représentation schématique des deux niveaux de modélisation du couplage perception-action. Le couplage Information-Mouvement correspond aux relations fonctionnelles liant l'information et le mouvement tandis que le couplage Perception-Actuation correspond à l'intégration des caractéristiques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

### 3.1.1. Couplage Information-Mouvement

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

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

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

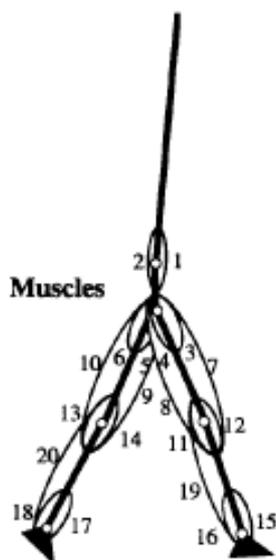


**Figure 10 :** Représentations des dispositifs expérimentaux utilisés par (A) Srinivasan et al. (1991) avec des abeilles et par (B) Duchon et Warren (2002) avec des humains, dans une tâche de déplacement dans un couloir. Les déplacements latéraux obtenus selon les différentes conditions de vitesse de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

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

### 3.1.2. Couplage Perception-Actuation

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



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

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

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

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

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