

Habilitation à Diriger les Recherches

PRÉSENTÉE PAR

Régis Thouvarecq

PARTIE II : SYNTHÈSE SCIENTIFIQUE

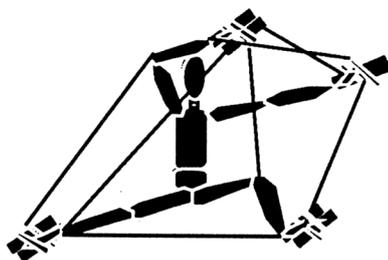
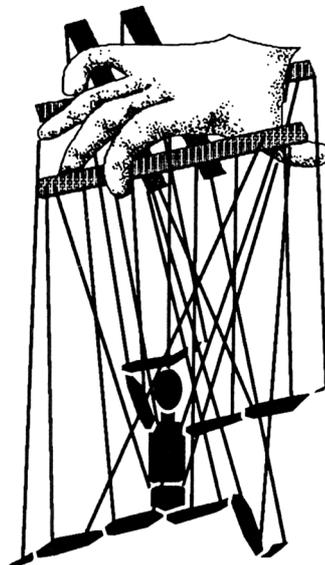
L'ETUDE DE LA POSTURE : DE LA PRESCRIPTION A L'EMERGENCE

Jury :

Mme Christine Assaïante (Rapporteur)	Université d'Aix-Marseille 1
M. Benoît Bardy (Rapporteur)	Université de Montpellier 1
M. Cyrille Bertelle (Examinateur)	Université du Havre
M. Didier Chollet (Président)	Université de Rouen
M. Olivier Gapenne (Rapporteur)	Université Technologique de Compiègne
M. Daniel Mellier (Directeur)	Université de Rouen

*Je mesure la chance que j'ai eue de rencontrer à la fois un Maître
et un humaniste : le Professeur Jean Caston.*

Ne pas évoquer ici sa mémoire eut été plus que de l'ingratitude...



Extrait de Turvey (1990), p. 939



Ce document a été intégralement réalisé à l'aide de logiciels libres : OS Linux (distribution Debian), suite Open office pour la bureautique (police de caractères « Liberation Serif »), et Bibus pour la gestion de la bibliographie et sa mise en page.

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Les approches cognitivistes.....	6
2.1. Fondements théoriques.....	6
2.2. Cognitivism et motricité.....	10
2.3. Cognitivism et posture.....	19
2.4. Contributions personnelles dans ce domaine.....	35
2.5. Limites des approches cognitivistes.....	46
3. Les systèmes complexes.....	51
3.1. Une autre vision du monde.....	53
3.2. Systèmes complexes et motricité.....	57
3.3. Systèmes complexes et posture.....	78
3.4. Contributions personnelles dans ce domaine.....	87
3.5. Limites des approches complexes.....	96
4. Réconcilier les approches	105
5. Perspectives.....	109
Références Bibliographiques.....	118

« Je n'essaierai pas de les décrire car je ne suis pas sûr de les avoir vus, malgré l'aveuglante lumière. Je m'explique. Pour voir une chose, il faut la comprendre. Un fauteuil présuppose le corps humain, ses articulations, ses divers membres; des ciseaux l'action de couper, que dire d'une lampe ou d'un véhicule ? Le sauvage ne perçoit pas la bible du missionnaire; les passagers d'un bateau ne voient pas les mêmes cordages que les hommes d'équipage. Si nous avions une vision réelle de l'univers, peut être pourrions nous le comprendre.

[...] Les larges barreaux de fer, dont le nombre ne devait pas dépasser la dizaine, étaient disposés à des intervalles irréguliers. Cette échelle, qui postulait l'usage de mains et de pieds, était compréhensible et j'en éprouvais un certain réconfort » – Jorge Luis Borges (1975)¹

1. Introduction.

Comme évoqué dans la partie curriculum vitae, suite à une formation en psychologie, mon parcours dans la recherche est caractérisé par une conversion thématique très précoce. En effet, je suis passé de l'étude de l'effet d'un neurotransmetteur sur la mémoire au cours du vieillissement chez la souris, qui fut l'objet de ma Thèse de Doctorat, à celle de la perception et l'action chez l'Homme. Dans ce domaine, mes travaux se sont, dans l'ordre chronologique, orientés vers la perception kinesthésique des orientations, la prise d'information en rapport avec la performance et, enfin, la régulation posturale. Ce qui donne sa cohérence à l'ensemble et qui reste mon centre d'intérêt premier est la question sous-jacente de la manière dont l'individu agit dans son environnement. Ce « cheminement thématique », s'il fut problématique à certains égards, fut pour moi l'occasion d'explorer cette question, à travers la littérature et quelques travaux empiriques, à des niveaux très variés, depuis la psychopharmacologie jusqu'à des approches purement comportementales et fonctionnelles. Et ce parcours m'a permis de découvrir, au delà des ruptures méthodologiques auxquelles je m'attendais, d'autres ruptures bien plus inattendues. Ces dernières ont fortement influencé ma réflexion, ce que sont mes travaux actuels et ce que sont mes projets, dont une partie est présentée dans le dernier chapitre de ce document. Cette synthèse propose donc, plus qu'une revue de l'ensemble des travaux auxquels j'ai pu participer, d'illustrer à travers le développement argumenté d'un exemple très spécifique, en l'occurrence la posture, le problème des

1 Borges J. L. (1975) *There are more things* in « le livre de sable » (recueil de nouvelles), Gallimard, pp. 67-68.

hypothèses théoriques qui se posent aujourd'hui dans l'étude de l'action d'un individu dans son environnement. Plus qu'à des réponses aux questions posées, la réflexion menée débouchera sur un positionnement, sachant que ce dernier, s'il cherche à s'appuyer sur un corpus d'éléments tirés de la littérature scientifique, porte nécessairement une part de subjectivité.

Le choix de traiter de la posture dans le cadre de la synthèse scientifique s'explique par au moins trois raisons. Tout d'abord, ce thème est devenu pour moi le principal et fait l'objet de travaux et projets tant au sein du CETAPS que dans le cadre de collaborations nationales et internationales. Par ailleurs, les deux Thèses de Doctorat que j'ai encadrées (Croix, 2007; Gautier, 2007) et l'une des deux que j'encadre actuellement ont traité ou traitent de cette question. Enfin et surtout, ce thème est particulièrement illustratif, d'une part, des questions fondamentales qui se posent dans l'étude de la perception et de l'action et, d'autre part, de l'évolution ontologique et épistémologique qu'ont suivis mes travaux de recherche, en partant d'une conception très marquée par le cognitivisme vers une conception désormais organisée autour des théories des systèmes complexes.

Au sens général du terme, la posture d'un animal est définie comme le maintien du corps dans une position donnée et chaque espèce possède une posture de référence (Massion *et al.*, 1992). Elle est aussi, selon (Paillard, 1976), la manière dont l'organisme affronte les stimulations du monde et se prépare à y réagir. Issue de la phylogenèse, elle est à la fois, mode de relation avec le monde vivant et en particulier avec les membres de sa propre espèce, mais pas seulement (Bekoff & Byers, 1998), et mode de relation avec le monde physique à travers les fonctions antigravitaire (Paillard, 1986f) et éréismatique² (support de l'acte moteur orienté). Selon ce même auteur, il faut différencier parmi les actes moteurs, les téléocinèses qui sont des mouvements dirigés vers un objectif spatial, comme par exemple le pointage d'une cible et, les morphocinèses, mouvements expressifs générateurs d'une forme, comme par exemple l'écriture mais aussi la production de formes corporelles et posturales, qui relèvent de contrôles nerveux différents (Paillard, 1990). Toutefois, la pertinence de cette distinction entre ces deux fonctions semble sujette à débat (Wiesendanger, 1981). La posture est aussi une référence qui permet d'orienter le mouvement (Mittelstaedt, 1983). Bien que parfois utilisé dans le langage courant comme homonyme de posture, le terme d'attitude est, quant à lui, le plus souvent utilisé pour parler de la fonction de relations sociales quand le terme de posture est réservé à la dimension physique ou purement sensori-motrice. Le problème de cette dichotomie posture / attitude, pourtant fort pratique, est qu'elle sous tend une distinction entre les deux fonctions qui ne se justifie pas nécessairement. En effet, c'est, entre autres, à travers le décodage par son entourage (maternel en particulier) des besoins exprimés par son tonus postural,

2 Du grec *ereisma* qui signifie « échafaudage ».

que débutera la vie sociale du petit Etre Humain, base de son développement (Wallon, 2002, réédition). Au delà des aspects développementaux, il est aussi connu que la dimension sociale de la posture modifie son organisation, quand bien même celle-ci doit exercer sa fonction de maintien du corps. Il est même des situations, comme dans la danse, le théâtre ou le mime, où l'individu cherche à se placer dans des postures qui défient les lois de la physique dans le seul but d'exprimer, à travers son attitude, une idée ou une émotion ; ou d'autres encore, comme la gymnastique, dans laquelle l'essence même de l'activité est de se placer, à certains moments des enchaînements, dans des postures qui n'ont d'autres buts qu'elles-mêmes. Sans nier l'intérêt des dimensions sociales ou symboliques de la posture, les travaux présentés ici ne traiteront que de la dimension « relation au monde physique ».

En faisant « le choix », au cours de l'évolution, de consacrer les membres antérieurs à des fins de préhension puis techniques, l'Etre Humain a libéré de l'espace dans la boîte crânienne ce qui était une condition nécessaire (mais non suffisante) au développement du cerveau (Leroi-Gourhan, 1964). Mais il a aussi fait, par là même, « le choix » original d'utiliser comme posture de référence la posture érigée sur les membres postérieurs (puis inférieurs), ce qui n'est pas sans poser un certain nombre de problèmes. En effet, la posture érigée, qui est un « bricolage évolutif » (Pillardeau, 2003) engendre chez l'être humain un grand nombre de traumatismes en particulier au niveau lombaire (Prakash *et al.*, 2007, pour revue). Par ailleurs, l'acquisition de cette posture puis de la marche, qui passe par plusieurs stades et se déroule sur une longue période (Assaiante, 2001), fait de l'être humain l'animal qui mettra le plus de temps à acquérir sa posture de référence après la naissance. Mais surtout, en se redressant, l'Homme a, à la fois, remonté considérablement son centre de gravité et réduit le polygone de sustentation se plaçant ainsi en situation d'équilibre précaire (Massion, 1992). Cette précarité est particulièrement vraie dans la fonction éréismatique mais l'est aussi lors du maintien de la posture sans action motrice surajoutée. Dans ce dernier cas, la moindre mesure quand ce n'est pas l'observation simple, montre que l'immobilité totale à l'état d'équilibre n'existe pas chez l'Homme debout. Il est traditionnel de considérer les travaux de Sherrington (1906) comme les premières propositions³ quant au fonctionnement de l'organisation posturale dans lesquelles celle-ci était considérée comme le fruit du fonctionnement de chaînes réflexes de facilitations et d'inhibitions activées en réaction aux perturbations de l'équilibre. Les évolutions de la physiologie, des neurosciences mais aussi de la psychologie ont par la suite amené les chercheurs à poser la question de la régulation posturale de manière plus large. La posture est alors considérée comme un cas spécifique du fonctionnement de la motricité générale : spécifique car la posture est le support de mouvements surajoutés et doit assurer la fonction d'équilibration mais générale puisqu'il s'agit en

3 Bien que quelques années plus tôt Babinski ait publié des observations en la matière (voir note 14).

dernier ressort d'organiser une forme de mouvement qui permette d'atteindre ces objectifs. Cette dichotomie qui fait la particularité de la posture est d'ailleurs largement remise en cause puisque selon Stoffregen *et al.* (2007), la posture pour elle-même n'existe pas mais est au service d'autres comportements possibles durant le maintien de la posture érigée. De ce fait, selon les points de vue, soit les règles générales qui permettraient d'expliquer la régulation posturale pourraient s'appliquer à la motricité en général et inversement, soit elles ne font qu'une. La question fondamentale qui est alors posée, avant même de s'intéresser à la posture, est celle de l'Homme (et/ou l'animal) en mouvement et de manière plus globale, celle d'une conception de ce qu'est un Homme dans son environnement. Et dans ce domaine, et si l'on se restreint au champ scientifique, il n'existe pas qu'une Vérité.

En effet, il ressort de la littérature dans ce domaine deux grandes approches de ces questions, ce qui au regard de l'épistémologie classique poppérienne peut sembler problématique. Selon Popper (1935), il est possible à travers la réfutabilité de distinguer le scientifique (composé d'un ensemble de propositions réfutables) du non scientifique, et il existe, au sein de la science, une concorde autour d'une théorie acceptable à un moment donné (ce qui n'exclut pas la multiplicité des disciplines). Cette référence à Popper est importante car les propositions de cet auteur ont pesé lourdement sur la psychologie et sur les distinctions voire oppositions qui existent dans cette discipline. En effet, en revendiquant Popper ainsi que la méthode hypothético-déductive et l'expérimentation telles qu'initiées par Claude Bernard, ce qui était appelé (et l'est parfois encore) « la psychologie expérimentale » au sens large, fille naturelle du behaviorisme méthodologique et qui va de la psychophysique à l'étude des aspects les plus élevés de la cognition (à condition de « mesurer »), s'attribuait les « vertus » de la médecine et par la même une forme de scientificité⁴. A contrario, elle ne pouvait par contraste que placer hors de ces « vertus » une partie de la psychologie clinique et creuser par là même le fossé entre les deux. Et force est de constater que, si face aux limites rencontrées, cette position d'une psychologie qui veut se parer des atouts d'une science « dure » a évolué ces dernières décennies vers une plus grande acceptation des herméneutiques, cette évolution n'est que partielle. Toutefois, sans nier l'héritage poppérien, il semble que le manque de concorde dans la littérature psychologique qui traite de motricité trouve des explications moins dans l'opposition entre clinique et expérimentation que dans une opposition paradigmatique telle que définie par Kuhn (1962). En s'appuyant sur l'histoire des sciences et en intégrant les facteurs sociaux, il décrit l'évolution scientifique en terme non pas de continuité mais de ruptures et de

4 Il est fort surprenant de constater le poids de la méthodologie expérimentale dans nombre de cursus de psychologie et d'entendre dans des réunions pluridisciplinaires que les psychologues sont les spécialistes de la méthodologie et des statistiques.

révolutions scientifiques. Selon cet auteur, à un moment donné existe un paradigme, une conception scientifique universellement reconnue dans un domaine, qui correspond à un état particulier des croyances sociales, mais aussi des conceptions du monde qui sont sous-tendues. Ce paradigme passe d'abord par une étape de « pré-science » durant lequel la position théorique n'est guère acceptée et les travaux qui s'y rapportent sont souvent fragmentaires et éparpillés. En revanche la « science normale », selon l'expression de Kuhn, existe quand un consensus émerge autour de questions, méthodes et théories proposées dans un domaine (et toujours les conceptions sous-tendues), que le paradigme a un pouvoir explicatif suffisant pour regrouper une large majorité autour de lui. Durant une période de science normale, l'évolution est plus de nature cumulative et il y a recherche de complétion du paradigme, qui sur le fond évolue peu, accompagnée d'installation de sociétés savantes et de moyens de diffusions des connaissances attenants. Cependant, quand commencent à s'accumuler les données qui ne valident pas le paradigme et des questions auxquelles il ne peut répondre de manière satisfaisante, s'installe une période de crise. Cela se traduit par la contestation du paradigme en lui-même et l'émergence de nouvelles propositions à visées paradigmatiques, le plus souvent en rupture avec l'ancien, qui s'appuient souvent sur des idées issues d'autres champs mais pas nécessairement. L'arrivée d'un nouveau paradigme qui doit répondre aux questions laissées en suspens par le précédent ne signifie cependant pas la disparition (tout au moins immédiate) de l'ancien qui aura tendance à résister. La révolution sera faite lorsque le nouveau se sera imposé. Entre temps, il est tout à fait possible que deux paradigmes co-existent, ce que semble indiquer la littérature dans le domaine de l'étude de la motricité. Dans la mesure où les crises concernent des paradigmes elles concernent aussi les conceptions du monde qui sont sous-tendues et par là même dépassent le cadre stricte des disciplines remettant ainsi en cause l'autonomie de chacune d'elles. Selon Theureau (2006)⁵, face à différents paradigmes, le chercheur, avant de s'engager dans un programme de recherche s'engage ontologiquement⁶, c'est-à-dire fait des paris ou a des croyances quant à la nature des choses. Cet engagement a nécessairement une signification éthico-politico-religieuse⁷, mais aussi épistémique et pratique. S'il est personnel, il est aussi nécessairement partagé au moins en partie par les chercheurs qui participent au programme de recherche et, toujours selon cet auteur, le contenu de cet engagement n'est pas nécessairement

5 Theureau dans le champ de l'anthropologie cognitive se réfère plus aux programmes de recherche de Lakatos (Lakatos, I. (1994) *Histoire et méthodologie des sciences - programmes de recherche et construction rationnelle*. Presses Universitaires de France) et à Koyré (Koyré, A. (1973) *Etudes de la pensée scientifique*, Gallimard) qu'à Kuhn.

6 Il faut préciser que dans le programme du « cours d'action » développé par J. Theureau qui s'intéresse à l'activité humaine et à la construction du sens, il est plus question d'ontologie phénoménologique que d'ontologie au sens général du terme.

7 Les commentaires proposés par Maynard Smith (2001) quant au lien entre convictions personnelles et position « globaliste et réductionniste » (pp. 45 à 49), sont certes moins étayés et sans doute discutables, mais ouvrent un débat... intéressant.

« explicite ou glorieux »⁸ (Theureau, 2008, p. 463). Ce qui est entendu là par « non explicite » est toutefois ambigu. En effet, cela peut être non explicite vis-à-vis de l'entourage du chercheur mais aussi vis-à-vis de lui même. Le poids d'un paradigme (tel que le cognitivisme en psychologie) dans un domaine, associé par définition à un renforcement par l'institution de cette influence peuvent amener à ce que l'engagement du chercheur soit de fait, mais non volontaire. Dans une période de science normale (au sens Kuhnien) ou de début de crise, la formation reçue, l'engagement dans des travaux mais aussi la résistance du paradigme dominant peut induire tout simplement l'ignorance d'autres paradigmes émergents. D'autant que contrairement à la proposition popperienne, un paradigme ne disparaît pas lorsqu'il a été réfuté mais seulement lorsqu'il a été remplacé. Bien entendu, et tout particulièrement dans les sciences expérimentales, la prise de conscience de cet engagement ontologique ne se développe pas (lorsqu'il se développe) d'emblée et se construit au fur et à mesure des lectures et de l'engagement lui-même. En revanche, diriger des recherches dans un domaine dans lequel différents paradigmes co-existent (à différents niveaux de développement), ou plus précisément, dans lequel un paradigme vient contester le dominant nécessite sans doute une connaissance minimale des deux. Cela permet alors de situer les recherches en question et de leur donner du sens (qui passe par une cohérence ontologique ou une conscience des ruptures) et établir des perspectives. Toutefois, si faire comme dans la suite de ce document (chapitres 2 et 3) un bilan à un moment donné des deux approches, de leurs qualités et limites est une condition nécessaire à l'engagement, elle n'est pas suffisante dans la mesure où le positionnement s'appuie aussi sur une part de subjectivité qui est de fait et qui n'a donc pas à être revendiquée ni explicitée.

2. Les approches cognitivistes

2.1. Fondements théoriques.

Le cognitivisme prend ses origines à la fin des années 30 et durant la seconde guerre mondiale avec les travaux de mathématiciens comme Turing, les débuts de la cybernétique de Wiener et la naissance des premiers ordinateurs programmables (ENIAC, 1943-1946). Ces premières machines réalisaient des opérations simples en grand nombre et ont amené à l'idée que, ce qui était réservé à l'Homme, à savoir le raisonnement, pouvait être réalisé (tout au moins dans un univers fini) par une machine à traiter de l'information et que la logique serait la discipline qui permettrait de comprendre l'esprit humain. Puis, c'est au cours des années 50 et 60, en particulier au M.I.T., que naîtra « l'hypothèse cognitive » comme la nomment (pour la remettre ensuite radicalement en cause) Varela, Thompson & Rosch (1993) et qui sera formalisée à travers le modèle TOTE (Test Operate

⁸ Voir, par exemple, ce que dit Theureau (2008) au sujet des motivations de J.D. Watson, le co-inventeur de la double hélice d'ADN p. 463.

Test Exit) dans l'ouvrage de référence publié par Miller, Galanter & Pribram (1960). Selon cette hypothèse, le fonctionnement d'un ordinateur et celui de la cognition humaine sont tellement proches que comprendre l'un permettra de comprendre l'autre. L'Homme est alors considéré comme une machine à traiter de l'information, à capacité limitée, et l'ordinateur, le modèle qui permettra de simuler et par là même de comprendre la cognition (Andler, 1992, pour revue). Cette métaphore implique alors de fait une conception particulière du rapport entre le cerveau ou la machine qui « compute » et son environnement. En effet, les stimulations (visuelles, auditives, etc.) issues de ce dernier ne sont pas traitables en tant que telles et devront être transformées : cette transformation, qui passe par une étape de transduction du monde réel en monde « interne », se fait chez l'Homme sur la base de la perception tout comme elle se fait dans la machine à travers les périphériques d'entrée. Autrement dit, quelle que soit la nature de la machine considérée (mécanique ou biologique), celle-ci effectue ses opérations et construit sa base de connaissances à partir de représentations du monde. Cette idée de représentation symbolique résout alors de manière fort élégante le problème de la nature de l'information et des connaissances. En effet, peu importe la nature de l'information issue de l'environnement, et si le système cognitif dispose d'outils (naturels comme la perception ou non) pour le faire, celle-ci sera transformée en symboles de même nature que ceux qui forment les connaissances internes du système. Si le système ne dispose pas de ces moyens de transformer cette information alors, elle n'existe tout simplement pas pour celui-ci, sauf s'il s'équipe de systèmes pour y accéder comme le fait le biologiste qui utilise un microscope pour pallier les limites de son système visuel ou comme l'ont fait E. Muybridge et E.J. Marey avec la chronophotographie pour pallier la fréquence critique de fusion (environ 16 Hz en vision humaine). Cette hypothèse cognitiviste a connu un grand succès (c'est un euphémisme) jusqu'à devenir parfois, à tort, synonyme de cognitif, et fut une source de fécondité scientifique indéniable. Si l'Intelligence Artificielle est la fille naturelle de ce cadre théorique, d'autres disciplines s'en sont largement emparées. Ce fut le cas par exemple de la linguistique (Chomsky, 1971) mais tout particulièrement de la psychologie et des neurosciences. Dans le champ psychologique, le behaviorisme (Watson, 1930) et dans une moindre mesure, la Gestalt théorie (Kohler, 1964) qui s'étaient imposés ont « rapidement » été supplantés par le cognitivisme qui a ouvert de nouvelles voies ou proposé de nouveaux éclairages sur des questions posées quelques décennies auparavant. Ce qui ne signifie pas que les courants de pensée antérieurs ont disparu du jour au lendemain et les critiques apportées au cognitivisme, en particulier par les behavioristes quant au problème de la régression à l'infini, manquaient nécessairement de pertinence. Néanmoins, l'analogie Homme / ordinateur a alors permis de proposer des modèles de la cognition humaine de plus en plus élaborés et de plus en plus modularisés dans la plupart des domaines de la psychologie - attention, perception, orientation etc. -

la mémoire (Baddeley & Hitch (1974) pour la mémoire de travail ou Van der Linden & Bruyer (1991), pour revue) étant sans doute l'exemple le plus illustratif. Néanmoins, un certain nombre de critiques se sont fait rapidement entendre. Certaines d'entre elles étaient de nature épistémologique comme celles évoquées précédemment par Watson, la figure emblématique du behaviorisme, et regroupées tardivement par Skinner (1979), mais d'autres se posaient de toute autre manière. En effet, très tôt des mathématiciens comme Minsky & Papert (1969), ce dernier étant l'inventeur du langage informatique LOGO, montrent les limites des réseaux de neurones tels qu'ils étaient envisagés à l'époque et proposent l'idée d'utiliser des systèmes multi-agents supervisés pour résoudre la question. La relance théorique proposée et mise en oeuvre par McClelland & Rumelhart, (1986) par les modèles dits néo-connexionnistes (Parallel Distributed Processing, modèles PDP), ont certes l'intérêt de proposer de nouvelles solutions au problème de la quantité d'information et par là-même de la simulation, mais ne remettent pas nécessairement en cause l'hypothèse fondatrice dans la mesure où la cognition est vue à travers l'existence de la représentation (symbolique ou émergente) d'un monde pré-déterminé⁹.

Par ailleurs, déterminer si c'est le succès des propositions cognitivistes qui a amené les spécialistes des neurosciences à s'en emparer ou bien, si l'inverse a eu lieu semble difficile et sans doute que les deux possibilités sont indissociables. Mais force est de constater que l'appropriation de l'hypothèse cognitiviste par les sciences du cerveau s'est faite sans réelle réserve. *« Parmi les facteurs à l'origine de ce renouvellement [des neurosciences], le moindre n'est pas l'emprunt massif que les chercheurs en neurosciences ont fait à la psychologie. Plutôt que de continuer à interpréter les fonctions cognitives à partir des effets de lésions pathologiques (ou expérimentales), les neurosciences cognitives ont exploité, à partir des années 1970-1980, les paradigmes de la psychologie cognitive. Les fonctions étudiées par la psychologie cognitive sont définies à partir de la notion de résolution de problèmes : quels sont, par exemple, les éléments opérationnels nécessaires à la réalisation d'un plan d'action, à la formation d'une intention, à l'identification du sens d'un objet, à la reconnaissance d'un visage, etc. Des concepts nouveaux sont ainsi apparus, à partir de la décomposition des fonctions plus globales prises en compte par les études classiques. La mémoire de travail, le calcul des références spatiales d'une action, l'encodage de la familiarité des mots ou des visages, etc., sont autant de fonctions cognitives élémentaires dont on peut rechercher la traduction en termes de fonctionnement d'ensembles neuronaux et de réseaux »*

9 En fait, les modèles connexionnistes et néo-connexionnistes sont au coeur du débat entre cognitivistes et « émergentistes ». La contradiction entre le connexionnisme qui suppose un fonctionnement en parallèle et des propriétés émergentes et un cognitivisme qui s'appuie sur une computation de symboles physiques ne peut sembler qu'apparente. Autant pour certains ces deux approches sont incompatibles autant pour d'autres, les modèles connexionnistes pourraient représenter des niveaux plus ou moins bas du traitement de l'information (Memmi, 1990).

(Jeannerod, 2002, p. 476). En effet, très tôt, les travaux dans tous les domaines des neurosciences (tout au moins intégratives), posent, sans le dire, l'idée du traitement de l'information. Ceci peut être illustré, pour ne citer que les plus célèbres, par les colonnes d'orientation de Hubel & Wiesel (1959), ou les cartes cognitives et neurones d'orientation hippocampiques de O'Keefe & Nadel (1978). En ce qui concerne un objet évoqué plus haut, à savoir le fonctionnement mnésique, le modèle proposé par Squire (1987) s'inscrit aussi dans cette approche théorique. Lorsque, de manière bien plus modeste, des travaux sont menés sur l'influence d'un neurotransmetteur (l'acétylcholine dans mon cas) sur l'apprentissage et la mémoire spatiale et motrice au cours du vieillissement (Thouvarecq, Caston & Protais, 2007; Thouvarecq, Protais, Jouen & Caston, 2001), le pré-supposé est que des structures particulières (en l'occurrence l'hippocampe) participent d'un processus de traitement de l'information et qu'il est possible d'envisager l'action de chaque élément dans son fonctionnement. Imbert (1992) résume le problème de la façon suivante : « *les phénomènes cognitifs dépendent des mécanismes cérébraux dans le sens où l'on peut dire, par analogie que le traitement de l'information par un programme informatique dépend du détail des circuits électroniques de l'ordinateur sur lequel il est, à un moment donné, exécuté* (p. 51) [...] *On ne peut vraiment espérer comprendre comment le cerveau travaille que si, au préalable, on a soigneusement décrit les opérations qu'il réalise et spécifié des théories précises sur la façon dont elles sont exécutées* » (p. 52). De ce fait, la frontière entre neurosciences intégratives et psychologie cognitive, à travers, par exemple, les travaux qui mettent en jeu l'imagerie cérébrale, sont devenues de plus en plus floues avec pour conséquence l'apparition de formes de validation circulaire : la psychologie trouve ses modèles validés par les neurosciences qui elles-mêmes construisent leurs modèles en s'appuyant sur la psychologie d'inspiration cognitiviste. En plus de ces problèmes épistémologiques, des limites ont aussi été très vite évoquées, tel que le problème du goulot d'étranglement (entre l'unité centrale et la mémoire) de Von Neumann. De même, des critiques liées au problème de la signification comme celles posées par Bruner (1997), pourtant l'un des fondateurs du cognitivisme ou de Searle (1980), qui à travers par exemple la métaphore de la chambre chinoise montre que le mental est nécessairement plus qu'un ensemble de règles syntaxiques manipulant des symboles, sont apparues. Toutefois, le cognitivisme s'est imposé, durant plusieurs décennies, quasiment sans partage, dans l'étude de la cognition.

2.2. Cognitivisme et motricité

Le monisme de l'hypothèse cognitive implique, par essence, que la motricité est intégrée dans le processus global qui fait qu'un individu qui agit dans un environnement peut être envisagé avant tout comme un système qui à la fois échange de l'information avec l'environnement dans lequel il se trouve, et traite des informations pour le faire. On peut noter toutefois, comme le fait Rosenbaum (2005), dans un article sur-titré « la cendrillon de la psychologie », que la motricité est un peu le parent pauvre de la psychologie traditionnelle, que ce soit en terme d'articles publiés ou de présence dans les manuels de psychologie cognitive. Selon, cet auteur, plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette situation, qu'il énumère et développe¹⁰. Ceci dit, si ses arguments sont solides, cela ne signifie pas pour autant que le cognitivisme a totalement négligé la question de l'action motrice.

Dans ce domaine, dès les années cinquante, des lois ont été formalisées. En ce qui concerne le temps nécessaire à engager une action motrice, la loi de Hick (1952) stipule que l'augmentation du temps de traitement (pour décider de choisir entre plusieurs solutions équiprobables) est proportionnelle au nombre de possibilités selon une loi Log binaire : si le temps de traitement vaut t pour deux possibilités, il vaudra $2t$ pour quatre possibilités et $3t$ pour huit etc. En ce qui concerne l'exécution motrice en elle-même, la loi de Fitts (1954), indique que, lorsque l'on augmente l'exigence de précision dans une tâche (de pointage alternatif dans l'expérience princeps) la vitesse diminue : c'est l'échange vitesse-précision. L'interprétation donnée est que plus la précision demandée est grande plus le sujet doit traiter d'information et que par conséquent, et du fait des limites de l'Homme en la matière, il lui faudra plus de temps. De plus, cette loi s'applique que l'action soit réalisée ou imaginée (Decety, Jeannerod, Germain & Pastene, 1991). Si, dans ces deux exemples, l'analogie Homme / ordinateur est claire, elle l'est encore plus dans la métaphore du programme moteur. En effet, le paradigme du traitement de l'information implique la sujétion du système musculo-squelettique à une instance supérieure de nature informationnelle qui prescrira les contractions comme l'ordinateur prescrit à un périphérique de sortie. Plus précisément, dans une vision purement centraliste, le programme moteur a tout d'abord été considéré comme une suite finie d'instructions qui vont s'appliquer sans effet notable des rétroactions (Keele, 1968). Toutefois, cette conception va rapidement laisser place à celle d'un programme moteur intégré dans un

¹⁰ Les hypothèses qu'il propose sont les suivantes, les trois dernières étant selon lui les plus plausibles : (i) aucun célèbre psychologue ne s'est intéressé à la question, (ii) la motricité n'est pas un problème propre à l'Humain, (iii) la motricité ne reflète pas « l'intelligence », (iv) les difficultés méthodologiques qu'elle pose, (v) ce qui précède la motricité (perception, « pensée ») est plus important à étudier, (vi) la proximité supposée entre motricité et behaviorisme amène à « jeter le bébé avec l'eau du bain », (vii) les psychologues considèrent que les neurosciences couvrent ce champ. Dans une réponse à cet article, Guastello (2006) indique que la question est peut être mal posée et que les approches non-linéaires, en dépassant les limites du cognitivisme peuvent relancer ce domaine d'étude.

ensemble qui inclut, selon un modèle cybernétique, des boucles de rétroactions, et une instance de comparaison entre ce qui doit se réaliser et ce qui se réalise vraiment. Le modèle en boucle fermée (« closed Loop model ») de Adams (1971), expliquant comment, à partir d'un « programme moteur modeste », le mouvement, par rétroaction, peut être régulé en cours d'exécution et qui s'appliquait à des mouvements lents et continus en est l'illustration. Cette idée n'était pas tout à fait nouvelle puisque, dans les années quarante, Bernstein (1996), dans son essai 4 (*On the construction of movement*) reporté dans un ouvrage coordonné par M. Latash et M. Turvey indique : « *Pour qu'un membre applique une commande cérébrale et fasse exactement ce qui est requis, le cerveau doit avoir de manière continue le contrôle sur le mouvement. Cela signifie nécessairement que les organes sensoriels doivent continuellement envoyer des « signaux » au cerveau concernant l'exécution du mouvement et lui permettre d'introduire sans délai les changements requis (corrections) [...] Les récepteurs doivent principalement être capables d'informer le cerveau au sujet des aspects les plus essentiels du mouvement, c'est-à-dire ces aspects dont la mauvaise exécution ne mènerait pas seulement à une mauvaise coordination mais aussi à sa totale perturbation* » (p. 105)^{*11}. Toutefois, il faut noter que les travaux de Bernstein n'étaient (quasiment) pas publiés à l'époque (Feigenberg & Latash, 1996). Ainsi, le modèle de référence (encore à ce jour) en la matière, a été proposé par Schmidt (1975, 1993). Cet auteur s'inspire largement des idées du cognitivisme et de ses prédécesseurs en proposant une « théorie des programmes moteurs ». La définition qu'il en donne, à savoir « *localisé centralement qui définit les détails essentiels d'une action motrice* »* (Schmidt, 1993, p. 319) est sans ambiguïté. Toutefois, les supports et formats de ce programme ne sont pas clairement définis. L'analogie utilisée (Schmidt, 1993) d'un disque de phonographe contenant l'ensemble des informations essentielles mais dont on peut faire varier les caractéristiques de la musique jouée (en augmentant le volume, en faisant tourner l'appareil plus ou moins vite...) laisse tout de même entrevoir la nature discrète et séquentielle du programme moteur. Néanmoins, il peut être noté qu'en tant que tel le mot « représentation » n'apparaît guère dans le vocabulaire adopté par Schmidt qui préfère « traitement de l'information » ce qui évacue de fait une partie de la question. Paillard (1986e) de son côté, dans un modèle, qui s'inspire plus de la physiologie et qui distingue des niveaux de contrôle cognitif (conscient) et sensori-moteur (auto-adaptatif) interdépendants, considère le programme moteur comme un « *ensemble de modules interconnectés, dont la stimulation, à partir de structures « nodales » de déclenchement, libère toute une activité pré-organisée qui s'exprime dans un acte moteur biologiquement significatif* » (p. 196). A partir d'études de différentes formes d'apraxies, il montre quelles peuvent être, à travers les

11 * indique que la traduction est celle de l'auteur du document. Dans le cas particulier de cette référence il s'agit d'une « traduction de traduction », du russe à l'anglais (par M. Latash) puis au français.

différents étages du système nerveux central et périphérique, les étapes qui amènent à l'exécution motrice. Néanmoins, si les étapes nerveuses sont décrites, le format en lui-même du programme moteur, de ses antécédents et du passage des uns à l'autre ne sont pas formellement définis. Ceci dit, s'il n'est pas aisé de faire le lien entre les deux approches, et si la nature même du programme moteur reste quelque peu indéfinie, l'articulation de celles-ci - et malgré un rapport niveau fonctionnel / niveau structural qui diffère de Schmidt à Paillard - offre un panorama intelligible du contrôle de l'action.

Pour Schmidt (1975, 1993), la production et la régulation du mouvement ne s'appuient pas sur un schéma stocké dans une mémoire mais sur deux. Dans des conditions initiales et en fonction d'un but, le schéma de rappel qui contient les règles générales du mouvement (le corps du programme) à réaliser permet d'initier le mouvement. Ce programme s'applique à un ensemble de mouvements similaires pouvant mettre en jeu différents segments, d'où son appellation de Programme Moteur Généralisé (PMG). Une fois paramétré (segments, force, vitesse direction), le programme donnera la suite d'instructions (composé donc d'invariants et de paramètres) qui s'appliquera au système musculo-squelettique¹² sous forme de contractions (et relâchements) musculaires ce qui provoquera nécessairement de l'information proprioceptive (via les fuseaux neuro-musculaires essentiellement), vestibulaire etc. Ces contractions musculaires auront un effet sur l'environnement qui pourra être capté par les extérocepteurs (principalement la vision). Simultanément au schéma de rappel est évoqué le schéma de reconnaissance. Celui-ci contient les informations relatives aux rétroactions proprioceptives et extéroceptives attendues. La comparaison entre ces informations (proprioceptives et extéroceptives, le « renforcement subjectif ») perçues et celles attendues permet (si la durée de mouvement est suffisamment grande) de corriger le mouvement en cours de réalisation (figure 1).

12 Pour en revenir à la question du format du programme, l'usage du terme de « schéma » et l'idée de règles communes qui s'appliquent à ensemble de mouvements d'une même classe dans différentes situations et pour différents segments fait inmanquablement penser au schème mis en jeu dans l'activité cognitive selon le modèle Piagetien. Toutefois, la filiation entre les deux n'est pas, à ma connaissance, débattue.

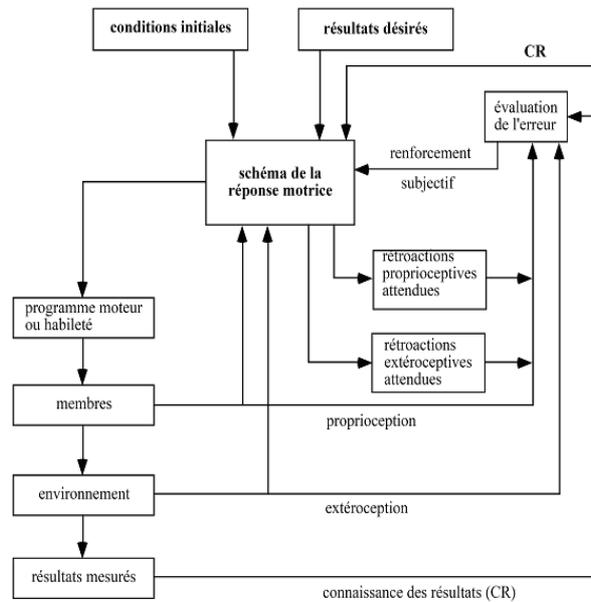


Figure 1 : *Modèle du contrôle moteur selon Schmidt (1977, 1993)*

Cette idée de schéma de reconnaissance offre un pendant fonctionnel à la copie d'efférence décrite par les physiologistes (von Holst, 1954; von Holst & Mittelstaedt, 1969). De ce point de vue, le rôle de comparateur du cervelet qui exerce sa régulation sur la commande motrice par voie rétroactive (boucle basse) et proactive (boucle haute) a été largement documenté (Manto & Oulad Ben Taib, 2010, pour revue) tout comme son influence dans les domaines spatiaux (Hilber *et al.*, 1998). Enfin, suite à la réalisation de l'action, le sujet dispose du résultat objectif, environnemental de celle-ci. La connaissance des conditions initiales, de la spécification des réponses, des conséquences sensorielles et du résultat obtenu permettront, au cours des répétitions, d'affiner les schémas et/ou de modifier les règles qui les constituent. Dans ce modèle, la mise en oeuvre de cette programmation motrice et de ses conséquences n'est que la troisième étape, précédée de la prise d'information, puis de la prise de décision, à l'intérieur d'un processus global de traitement de l'information. Sans doute que la plus grande qualité de cette proposition théorique est qu'elle s'applique tant à des mouvements courts en boucle ouverte qu'à des mouvements longs en boucle fermée et tant à des mouvements discrets qu'à des mouvements continus. De plus, le modèle de Schmidt permet d'intégrer les concepts généraux de la psychologie cognitive et des neurosciences et, à ce titre, s'inscrit parfaitement dans le courant cognitiviste. Toutefois, si les programmes moteurs évoluent au cours de l'apprentissage et de l'expérience, la question de leur origine reste sujet à débat. Ainsi, selon Zelazo (1983), qui s'appuie sur l'exemple de la marche, le développement moteur est sous dépendance du développement cognitif. Ses arguments sont que la marche est présente à la naissance, et que quelle que soit la culture, pourtant, elle n'est pas

actualisée avant 9 ou 10 mois. Selon cet auteur, la question n'est que celle des capacités à traiter de l'information, indiquant par là même l'importance et surtout la primauté qui a pu être accordée à la computation dans l'étude de la motricité, même si cette conception est largement et immédiatement remise en cause (Thelen, 1983).

Dès lors qu'il est admis que la motricité n'est que la conséquence de la computation et qu'elle s'inscrit donc dans un processus plus ou moins linéaire constitué d'étapes, l'importance et le fonctionnement de chacune d'entre elles et leur articulation vont pouvoir être analysés séparément. Par exemple, dans le domaine de la perception, puisque la physiologie sensorielle indique que les capacités structurales des récepteurs sensoriels varient peu d'un individu à un autre et que l'expérience et le développement ne les modifient guère (Williams & Ward, 2003), si ce n'est à travers la pathologie et le vieillissement, la plus grande partie des recherches s'est intéressée aux stratégies de recherche d'information, en particulier, mais sans exclusive, dans la modalité visuelle, que ce soit dans le domaine de l'ergonomie cognitive (Neboit, 1983), de l'apprentissage et de l'optimisation de la performance (Williams & Grant, 1999) ou de l'expertise sportive (Williams, Davids & Williams, 1999). Pour ce faire, deux grandes méthodes ont été utilisées. La première consiste, grâce à différents dispositifs techniques (Carpenter, 1988), à suivre les fixations rétiniennes au cours d'une tâche perceptivo-motrice pour en déduire, à partir des zones de la scène préférentiellement fixées par le participant, quelles informations il utilise (Abernethy, 1990b). La deuxième méthode, utilisée en particulier dans le cadre d'activités sportives est celle dite de l'occlusion spatiale. Dans ce cas, les sujets sont placés face à des films vidéos sur lesquels, selon les conditions expérimentales, des zones spécifiques de la scène sont supprimées par l'ajout d'un cache (occlusion), noir le plus souvent (Abernethy, 1990a). Plus récemment, grâce à l'évolution des techniques de retouche de l'image numérique les zones ne sont plus cachées mais tout simplement supprimées. Le participant voit alors une scène sur laquelle une zone de premier plan manque, remplacée grâce à un traitement numérique de l'image par ce qui se trouve en arrière plan, le fond du court de tennis dans cet exemple (Müller, Abernethy & Farrow, 2006). Les deux formes d'occlusion sont d'ailleurs implicitement considérées comme équivalentes, puisque dans leur étude de 2006, Williams, Hodges, North & Barton ne distinguent pas l'usage qu'il font de la suppression numérique de l'utilisation d'un cache opaque tel qu'employé dans l'étude de 1999 (Williams, Davids & Williams, 1999), publication par laquelle ils justifient la méthodologie, ce qui, en soi, mériterait d'être discuté. En effet, l'incongruité d'un individu sans tête dans une scène visuelle a sans doute des effets sur l'attention portée par le sujet à cette zone spécifique. Quoi qu'il en soit, dans les deux cas, la dégradation des performances motrices est attribuée au déficit d'information causé par l'occlusion

ou la disparition de la source d'information et l'importance relative de cette dernière en est alors déduite. Que ces travaux utilisent les méthodes de fixation rétinienne ou d'occlusion (quelle qu'en soit la forme), il ressort qu'avec l'expérience, les sujets prédisent (et donc régulent leur motricité en conséquence) avec moins d'information, concentrent leur recherche sur un nombre de zones restreint et développent des stratégies de recherche active de l'information utile (Goulet, Bard & Fleury, 1989).

De plus, l'approche cognitiviste permet d'envisager de manière assez simple le problème de l'énergie et de son utilisation au cours de l'acte moteur. Dans ce cadre, il est proposé de distinguer en l'être humain deux machines : d'une part, la machine bio-énergétique permettant la survie, l'homéostasie, et d'avoir de l'énergie puisée dans l'environnement, disponible pour la motricité et, d'autre part, la machine bio-informationnelle qui, elle, se « nourrit » d'information (Paillard, 1986d); la première étant sous dépendance de la deuxième. L'utilisation optimale de l'énergie disponible (comme c'est le cas chez un sportif expert par exemple) est la conséquence d'une gestion très fine de cet aspect par la machine bio-informationnelle. Ce point de vue ne signifie toutefois pas que le rapport entre énergie et information a été purement et simplement ignoré. Dans la continuité des travaux de Sanders (1983) qui a proposé un modèle énergético-cognitif dans lequel trois mécanismes (éveil, activation, effort) influencent le traitement cognitif, différentes études se sont attachées à déterminer les liens entre système énergétique et système informationnel. L'objectif de ces études était de déterminer si la facilitation induite par l'activité physique observée dans des expérimentations de Temps de Réaction (TR) (Davranche, Burle, Audiffren & Hasbroucq, 2006) était liée à une diminution du temps de traitement (pré-moteur) ou à une diminution de l'activité musculaire en elle-même, c'est-à-dire liée à l'activité au sein des fibres musculaires, appelée temps moteur. L'ensemble des résultats indique que l'activité induite par un exercice physique intense diminue le temps moteur mais pas le temps pré-moteur (Audiffren, Tomporowski & Zagrodnik, 2008) renforçant l'hypothèse de la séparation de la machine bio-énergétique et de la machine bio-informationnelle. En revanche, l'activité cognitive, telle que l'imagerie mentale a un effet sur les paramètres physiologiques (telle que la fréquence respiratoire), proportionnel à l'effort imagé (Decety, Jeannerod, Germain & Pastene, 1991). Toutefois, le lien entre les deux est asymétrique. Un peu à l'image du cortex, qui au cours de l'évolution, est venu s'ajouter aux structures sous-corticales, la machine bio-informationnelle, apparue plus tardivement (dans sa version développée), contrôle la machine bio-énergétique. Cependant, inversement, cette dernière peut, dans certains cas, contraindre le système nerveux à s'adapter (à travers ses capacités de plasticité). Par exemple, des inversions de tendons (au niveau palmaire), réalisées suite à des lésions traumatiques, montrent la

capacité de l'Homme à ré-organiser partiellement les schémas moteurs pour fléchir un doigt à l'aide d'un groupe musculaire initialement utilisé pour en fléchir un autre. Cependant, cela se fait au prix d'une forte charge attentionnelle et de conflits entre patterns anciens et nouveaux. Et surtout, là où l'Homme réussit, le singe ne réussit qu'en partie et le rat échoue, ceci indiquant l'importance des structures corticales et des voies cortico-spinales (Paillard, 1986c, pour revue).

Par ailleurs, l'être humain étant considéré comme un canal unique de traitement de l'information (Welford, 1977) à capacité limitée, l'attention devra être orientée en fonction de la tâche (Posner, 1980). Et comme la motricité est envisagée en tant que conséquence du traitement de l'information, celle-ci voit ses ressources potentielles plus ou moins limitées par le coût attentionnel des tâches réalisées. Le rôle de l'attention a été particulièrement étudié au cours de l'étape de prise de décision à travers les temps de réaction (Rosenbaum & Kornblum, 1982) et une modélisation dans le cadre de l'activité du sportif (expert) a même été proposée (Nougier, Stein & Bonnel, 1991). Dans cette dernière, les auteurs proposent que les experts sportifs, en automatisant une partie des opérations de traitement, disposent de ressources attentionnelles pour s'adapter aux contraintes de la tâche. Ce goulot d'étranglement a par ailleurs aussi des effets au niveau de la sortie, c'est-à-dire de l'exécution motrice et de sa programmation. Il est en effet très difficile de réaliser de manière simultanée deux mouvements (comme battre des rythmes des deux mains) ayant des structures temporelles différentes, suggérant que le système peut répondre plus facilement lorsque deux actions ont une même structure temporelle (Klapp *et al.*, 1985). Schmidt (1993) propose alors que le système moteur ne peut exécuter qu'un seul programme moteur à la fois et tend à vouloir organiser les actions des différents segments à travers une même structure temporelle.

De la même manière, la fonction prépondérante de la représentation dans le cognitivisme a généré des travaux appliqués à la motricité. Si des contradictions existent quant à la nature analogique ou amodale des représentations (Kosslyn, 1977), l'objet de ces recherches, au-delà des aspects pragmatiques telles que la ré-éducation ou la performance sportive a été double. D'une part, il s'est agi de montrer à travers cet exemple le lien que l'on pouvait faire entre le modèle fonctionnel et la mesure de l'activité du cerveau. Le résultat le plus marquant est l'analogie que les chercheurs ont montré entre l'activité cérébrale des aires visuelles ou pré-motrices lorsque le participant réalise l'action et lorsqu'il se représente mentalement en train de la réaliser (Jeannerod, 1994, pour revue). D'autre part, il s'est agi de montrer l'analogie entre faire une opération motrice et faire mentalement cette opération. En s'appuyant sur leur expérience principes de rotation mentale, Shepard & Metzler (1971) proposent que les opérations mentale ou physique de rotation sont semblables et supportés par les mêmes lois. Par ailleurs, la réalisation du mouvement étant une

conséquence de la prescription dont le paramétrage dépend de la position initiale du sujet agissant, la représentation de celle-ci a été aussi largement explorée. Une des questions principales fut celle des cadres de références dans un milieu orienté par l'environnement visuel mais aussi et surtout par la gravité. Cette question a par exemple ouvert, ou ré-ouvert si l'on se réfère aux travaux anciens de Aubert à la fin du 19^{ème} siècle, tout un pan d'étude sur la perception des orientations (Mittelstaedt, 1983) et l'influence des différentes modalités sensorielles (Gentaz *et al.*, 2001). Il en ressort que, lorsque l'orientation n'est pas donnée visuellement, la perception de l'orientation verticale par les sujets se construit à partir de la verticale gravitaire et de « l'axe Z » correspondant à l'orientation de l'axe du corps. Ces travaux indiquent aussi que certaines orientations sont perçues de manière moins précises que d'autres. Par exemple, en modalité haptique, l'orientation oblique est globalement perçue de manière moins précise que l'orientation verticale (Luyat, Gentaz, Corte & Guerraz, 2001). L'interprétation donnée est que pour l'orientation verticale, les références sont données directement par la gravité et l'axe du corps (si le sujet est debout) alors que pour l'orientation oblique, le participant doit « calculer » la position relative de ses segments par rapport à ces références naturelles (Howard & Templeton, 1966). De la même manière en modalité kinesthésique, lorsque le participant est debout, un ajustement de baguette à l'horizontale, possible simplement en appariant les angles bras / avant bras relativement à la gravité, est plus précis qu'un ajustement à la verticale (Lejeune, Thouwarecq, Anderson & Jouen, 2004; Lejeune *et al.*, 2009).

A un autre niveau, la question de la représentation dans le contrôle moteur a été aussi abordée à travers le rapport entre cognition et motricité. De façon à résoudre en partie la question de la quantité d'information à traiter, Paillard (1986e) propose qu'il existe deux niveaux de traitement de l'information par le système nerveux. Le premier niveau, sensori-moteur, rigidement câblé et en prise directe avec l'environnement, concerne les boucles externes et constitue le répertoire de base pour organiser les comportements. Le deuxième niveau, concerne les boucles internes « *qui alimentent le dialogue de l'appareil cognitif avec la représentation de l'environnement qu'il a constitué dans ses mémoires. Les structures sensori-motrices jouent donc un rôle d'interface, d'une part, entre les réalités physiques de l'environnement et les modèles internes que s'en constituent les activités cognitives, et, d'autre part, entre les projets d'action élaborés cognitivement et les productions motrices qui les expriment dans le monde physique* » (p. 205). Enfin, et fort logiquement, l'approche cognitive de la motricité accorde, à travers les travaux qui ont été réalisés en la matière une place très importante aux processus de retour d'information, ou feed-back. Ce terme n'est pas nouveau puisque von Holst & Mittelstaedt (1969) rapportent (p. 151) une référence de 1949¹³ (Tönnies) utilisant l'expression « central feed-back » pour décrire un système

13 Tönnies J.F. (1949) Die erregungssteuerung im zentralnervensystem, *Arch. Psychiatr. u. Z. Neur.*, 182, 478-535.

qui agit sur l'excitabilité spinale. Comme évoqué précédemment, il faut distinguer d'une part, les feed-back intrinsèques qui apparaissent au cours de la réalisation de l'action et, d'autre part, les feed-back extrinsèques reçus en plus de ceux fournis naturellement par le mouvement. Les premiers alimenteront principalement les processus de comparaison en cours d'action quand les seconds fourniront de l'information utilisée dans la représentation de l'action ainsi que dans le paramétrage de l'action à l'essai suivant. Si, quelques travaux se sont attachés à montrer qu'en créant artificiellement du feed-back intrinsèque par stimulation mécanique des fuseaux neuro-musculaires (Roll & Vedel, 1982), on pouvait créer chez le participant l'illusion du mouvement de segments de son propre corps, montrant par là même s'il en était encore besoin que la représentation du corps est avant tout celle d'un corps qui bouge, la plus grande part des recherches en la matière ont néanmoins porté sur le feed-back extrinsèque, qui est, le plus souvent, confondu avec le terme de feed-back tout court. Il est, en général, attribué au cours de l'apprentissage, deux fonctions au feed-back : une fonction de motivation et une fonction informationnelle. Pour cette seconde fonction, les études se sont attachées à déterminer, entre autres, les délais optimum entre un essai, la réception du feed-back et l'essai suivant. Il en ressort, avec des effets variables selon les tâches considérées il est vrai, que le délai entre la performance et la communication du feed-back doit être court de façon à ce que les éléments informationnels utilisés au cours de la tâche soient encore présents en mémoire au moment de la communication du feed-back. Par ailleurs, l'activité du sujet pendant ce délai influe aussi puisque l'insertion d'une tâche interférente durant ce délai induit de moins bonnes performances. L'interprétation proposée est que le traitement de l'information au cours de la tâche surajoutée utiliserait les ressources nécessaires au maintien en mémoire des informations utilisées lors de l'essai passé. En ce qui concerne le délai optimum entre communication du feed-back et l'essai suivant, il doit être suffisamment long pour permettre les opérations de traitement simultané des informations relatives à la réalisation de la performance et celles relatives au feed-back. De plus, ce temps dépend également de la complexité de la tâche (Schmidt, 1993, pp. 253-270). Néanmoins, il faut noter que si le feed-back facilite le contrôle de l'action, il n'est pas totalement indispensable puisque chez des singes désafférentés d'un segment corporel, une organisation du mouvement est possible sur la base d'une représentation interne de celui-ci (Bizzi, Hogan, Mussa-Ivaldi & Gizster, 1992).

Enfin, il faut noter que l'exploration de la perception et de la motricité a amené un argument non négligeable à l'hypothèse cognitive à travers l'étude de l'image motrice et des représentations motrices (Munzert, Lorey & Zentgraf, 2009, pour revue). En effet des activations neurales similaires, observées grâce aux techniques d'imagerie cérébrale, ont été relevées lors de tâche de

perception ou d'imagerie visuelle (Kosslyn, DiGirolamo, Thompson & Alpert, 1998; Kosslyn, Ganis & Thompson, 2001) mais aussi lors de tâches d'imagerie ou d'exécution motrice (Jeannerod, 1994). Selon ce dernier (Jeannerod, 2001), il y a équivalence fonctionnelle entre imagerie et exécution motrices et, en fait, l'image motrice serait le même processus neural que l'exécution, qui serait inhibé avant les étapes d'application. Cette équivalence fonctionnelle, empiriquement observée, montre alors la place prépondérante des représentations dans la construction de l'acte moteur. Toutefois, Sherwood & Lee (2003) font remarquer que l'apprentissage moteur en imagerie motrice, c'est-à-dire en l'absence de mouvement effectivement réalisé et par conséquent en l'absence de feed-back est contradictoire avec le modèle de Schmidt.

De cet ensemble il ressort que, du point de vue purement cognitiviste, l'étude des processus mis en jeu dans la motricité est avant tout l'étude de ce qui précède le mouvement (représentation, schémas) et des conséquences de celui-ci en terme d'information. La réalisation, la manière dont s'exécute le mouvement ne sont finalement guère pris en compte dans l'explication du contrôle moteur. Surtout, les critères qui déterminent les choix réalisés par le système moteur face aux multiples solutions qui existent pour réaliser un mouvement (Bernstein, 1967) ne sont guère non plus explicités. Toutefois, l'approche cognitiviste offre un cadre théorique largement assez cohérent, étayé, et complet pour pouvoir être appliqué à un cas particulier de la motricité : la posture

2.3. Cognitivism et posture

La posture érigée pose un problème mécanique : tenir debout nécessite que la projection du centre de gravité (CdG) se trouve dans le polygone de sustentation. Lorsque l'individu est debout, immobile, soumis à la gravité, ce CdG correspond au centre de masse (CdM), c'est-à-dire, au point où la distribution des masses du corps est uniformément répartie (Robertson *et al.*, 2004). Cependant, cette immobilité en posture érigée n'existe pas. En effet, l'Homme debout oscille continuellement. L'enregistrement des positions dans le temps du centre de pression (CdP), c'est-à-dire le barycentre des forces résultantes de la réaction au sol, enregistré grâce à une plate-forme posturographique, montre que le CdP oscille à l'intérieur d'une ellipse dont le grand axe est globalement antéro-postérieur, même s'il ne l'est jamais parfaitement. Les indices relatifs au déplacements du CdP les plus utilisés, au-delà de la surface de l'ellipse de confiance (ellipse qui contient, en général, 95% des points enregistrés), sont la longueur du déplacement du CdP, sa variance autour d'un point moyen sur les axes antéro-postérieur et médiolatéral, mais aussi sa vitesse. On considère alors qu'une petite ellipse et une faible variance sont preuves d'une régulation posturale efficace et qu'une grande vitesse de déplacement du CdP correspond à une grande quantité d'énergie dépensée pour maintenir la posture (Vuillerme & Nougier, 2003) et donc peu efficiente.

En la matière, des normes de mesures obtenues dans des situations normalisées sont utilisées dans le cadre d'évaluations cliniques de pathologies de la posture (Association Française de Posturologie, 1985). Les causes de cette permanente oscillation sont multiples. Tout d'abord, tenir debout suppose de lutter contre la gravité ce qui implique la mise en jeu permanente de tonus musculaire, en particulier des extenseurs. Or ce tonus musculaire ne peut être parfaitement réparti en permanence (Paillard, 1976). Par ailleurs, la moindre action surajoutée à la posture, comme étendre un bras devant soi pour attraper un objet, va avoir pour conséquence mécanique un déplacement des masses et une accélération vers l'avant du CdG qui, s'il n'est pas compensé, d'une manière ou d'une autre, pourra provoquer une sortie de la projection du CdG du polygone de sustentation et donc, soit une chute soit (ce qui est une forme de compensation) un pas vers l'avant (Bouisset & Zattara, 1987). Inversement, le fait de lâcher un objet lourd aura aussi pour effet de modifier la répartition des masses (Aruin, Forest & Latash, 1998) et par conséquent de provoquer du déséquilibre. Enfin, l'environnement dans lequel se tient debout l'individu peut être lui-même source de perturbations attendues ou non de l'équilibre qu'il lui faudra compenser. L'ensemble de ces activités posturales est directement déterminé par la gravité comme le montre la modification de la distribution du tonus musculaire postural (Clement *et al.*, 1984) et de l'organisation posturale (Lestienne & Gurfinkel, 1988) en situation de microgravité.

Si l'on se réfère à l'hypothèse cognitiviste, le problème de la régulation posturale est nécessairement une question de traitement de l'information. Dit autrement, comprendre la régulation posturale revient à comprendre comment de l'information est perçue et utilisée pour maintenir la projection du CdG dans le polygone de sustentation et quels sont les mécanismes de traitement qui le permettent. Selon Collins & De Luca (1993, 1995), il existe dans la régulation posturale, à l'image de ce qui se passe dans le contrôle du mouvement, deux mécanismes : l'un en boucle ouverte pour des régulations à très court terme et l'autre en boucle fermée pour des régulations plus longues relativement à des valeurs de référence, et ce, que la posture soit perturbée ou non par des forces extérieures (Massion, 1992). Mais il s'agit aussi de comprendre comment la posture est elle-même une source d'information au service de l'action. En effet, la tête, le tronc et les jambes sont une succession de modules superposés et mobiles les uns par rapport aux autres (Amblard, 1998; Mergner & Rosemeier, 1998), et au moins trois cadres de référence allocentriques sont disponibles. Ces derniers sont accessibles via les récepteurs cutanés plantaires, la vision et le système vestibulaire. La connaissance de ces références allocentriques et de la position des modules les uns par rapport aux autres, principalement via le système proprioceptif, sera alors la base de l'orientation et de la construction du mouvement (Massion, 1994; Paillard, 1971). Dans le cadre d'un

modèle de type cybernétique tel que décrit précédemment, la posture est donc une des sources d'information - et sans doute la principale - qui constitueront les « conditions initiales » du mouvement. La double fonction (maintien de l'équilibre et condition initiale du mouvement surajouté) de la posture et l'idée selon laquelle, dans le traitement de l'information des modules complémentaires peuvent co-exister, ont amené l'idée de deux systèmes impliqués dans le contrôle postural (Massion, 1994; Massion *et al.*, 1998). Dans cette conception, et en contradiction avec la théorie dite du pendule inversé articulé autour de la cheville (Nashner & McCollum, 1985), chaque segment (tête, tronc, jambes) est contrôlé relativement à sa propre position dans l'espace et relativement aux segments adjacents. La tête est considérée comme le plus important des trois modules puisqu'elle contient les récepteurs visuels et vestibulaires et sa stabilité dans l'espace sert de référence pour un contrôle qui se fait du haut vers le bas (top-down). Dans cette proposition, les deux systèmes mettent en jeu deux types de représentation : « *il existe dans le domaine postural, un schéma corporel postural qui inclut une représentation de la configuration du corps en relation avec le monde extérieur. Un second niveau est responsable d'organiser le contrôle postural sur la base des informations disponibles au niveau représentationnel* »* (Massion, 1992, p. 43). Le contrôle postural, fruit du traitement de l'information, s'effectue alors sur la base de quatre éléments : la valeur de référence régulée, le schéma corporel, les messages détecteurs d'erreurs et les réactions posturales.

La question de la valeur de référence régulée avait déjà été posée par Babinski en 1899¹⁴ (rapporté par Massion, 1984) selon qui les mouvements coordonnés des hanches, du cou et des genoux avaient pour but de maintenir la projection du CdG au sol à la même place. Selon de nombreux auteurs (Gollhofer, Horstmann, Berger & Dietz, 1989; Horak & Nashner, 1986; Massion, 1997), le maintien de la position du CdG dans le polygone de sustentation serait la variable clé contrôlée par le système nerveux dans le but de maintenir la posture érigée. Cependant, lorsque l'individu réalise une tâche supraposturale, c'est à dire une tâche qui se surajoute¹⁵ à la posture, la question se pose autrement. Pour Massion (1997), la valeur de référence régulée ne correspond pas uniquement à la projection du CdG, ce qui exclurait les changements qui pourraient intervenir dans la géométrie corporelle. Il prend l'exemple de la personne qui tient une tasse de liquide. Si la seule variable contrôlée était la position du CdG et non celle de la main par rapport à la gravité, il est fort probable que le contenu serait renversé. Dans un modèle différent, Lacquaniti (1992) propose que la valeur de référence concerne tout d'abord la géométrie du corps. Dans une étude portant sur

14 Babinski H. (1899) De l'asynergie cérébelleuse. *Revue de Neurologie*, 7, 806-816.

15 La distinction entre posture et tâche supraposturale ou leur intégration dans un tout ainsi que la question de l'existence de la posture en dehors de toute tâche supraposturale dépendent en fait du contexte théorique.

l'animal, en l'occurrence le chat (et donc pas sur la posture érigée), cet auteur détermine deux types de références régulées : la géométrie des segments et l'orientation du corps dans l'espace d'une part et, d'autre part, la stabilisation à travers la force de contact exercée qui contribue à réguler la position du CdG (Danis, Krebs, Gill-Body & Sahrman, 1998). De manière à confirmer l'existence de ces deux valeurs de références régulées, il fallait pouvoir s'affranchir de la gravité, ce que permettent les travaux en micro gravité. Les expérimentations dans ces conditions indiquent clairement l'existence simultanée de la régulation de deux références, l'une géométrique et l'autre cinétique (Massion *et al.*, 1995). Un autre problème est celui posé spécifiquement par des perturbations imposées à la posture lors de la réalisation de mouvement. En effet, déplacer le buste vers l'avant, lever le bras puis prendre dans la main un objet doté d'une masse provoque une accélération du CdG vers l'avant qui, si elle n'est pas compensée par une action dans la direction opposée, provoquera la chute. En fait, cette compensation peut être observée avant même l'initiation du mouvement à travers l'activation ou l'inhibition de groupes musculaires spécifiques (Bouisset & Zattara, 1987). Les paramètres de ces ajustements posturaux anticipés (APA) qui déterminent l'organisation spatiale et temporelle ainsi que l'amplitude des actions musculaires (Aruin & Latash, 1995; van der Fits, Klip, van Eykern & Hadders-Algra, 1998) dépendent de l'action volontaire qui sera réalisée, de son anticipation et donc de sa représentation comme l'indique le fait qu'il y a peu de lien entre déficit sensoriel et fonctionnement des APA (Forget & Lamarre, 1990). La coordination entre mouvement volontaire et APA se fait alors à travers deux processus de contrôle, hiérarchique et parallèle (Massion, 1992). Dans le premier, une copie de la commande centrale qui provoquera la réalisation du mouvement volontaire vers le système responsable de l'APA permet l'ajustement de celui-ci ainsi que la synchronisation avec l'action. Il est utilisé par exemple dans des tâches de type délestage (Paulignan, Dufosse, Hugon & Massion, 1989). Dans le second processus, le contrôle de la posture d'une part, et du mouvement d'autre part, sont sous contrôle d'une instance supérieure. Dans ce cas, le mouvement ne peut débuter qu'une fois la dynamique posturale établie. Dans les deux cas, l'APA est utilisé lors de la réalisation de mouvements pluriarticulaires (Minvielle & Audiffren, 2000).

La régulation posturale repose aussi sur la représentation du corps dans l'espace qui constitue le deuxième élément du modèle proposé par Massion *et al.* (1998). L'existence de cette représentation interne du corps, pour laquelle l'intérêt n'est pas nouveau puisque Paillard (1986f, p. 16) mentionne des réflexions en la matière réalisées par Head et Holmes et publiées en 1911¹⁶, est validée tout simplement par la capacité qu'a un individu, les yeux fermés, et donc sans référence extérieure (si ce n'est la gravité) à pointer une partie de son propre corps avec une grande précision.

16 Head H., Holmes G. (1911-1912) Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34, 102-245.

Souvent confondus sous le terme générique de schéma corporel, Paillard (1986b) distingue le corps identifié et le corps situé. Le premier concerne la connaissance de la forme de notre propre corps indépendamment de sa position. Le second, pour lequel la désignation de schéma corporel est plus approprié concerne la position du corps dans l'espace et sert de référentiel égocentré dans le contrôle moteur et le maintien d'une position stable (Gurfinkel & Levik, 1991). L'influence de la perception, en particulier proprioceptive, dans la construction permanente de ce schéma corporel et les conséquences de celle-ci sur la régulation posturale, semblent prépondérantes comme le montrent les études de stimulation par vibration tendineuse. Ces expérimentations ont permis de montrer qu'en l'absence d'informations visuelles, l'application de vibrations tendineuses au niveau de la cheville induit, chez le sujet debout, l'illusion de basculer et l'apparition d'une action posturale compensatrice dans le sens opposé à celui de l'illusion (Roll, Vedel & Roll, 1989). De plus, si l'absence de gravité perturbe l'orientation du corps dans l'espace (Clement *et al.*, 1984), ce n'est pas le cas pour ce qui concerne l'orientation des gestes relativement à la référence qu'est l'axe longitudinal du corps (Gurfinkel *et al.*, 1993).

Le troisième élément sur lequel repose la régulation posturale est la détection de l'erreur. L'évaluation de la différence entre position prescrite et position réelle permettra, en effet, selon le modèle cybernétique, de conserver l'équilibre (Nashner & Berthoz, 1978). Le cadre théorique cognitiviste suppose un traitement de l'information d'une part, linéaire, dans le sens où des étapes en précèdent nécessairement d'autres, et, d'autre part, modulaire. Par ailleurs, l'anatomie nerveuse indique depuis fort longtemps qu'il existe des aires spécialisées, en particulier dans le domaine perceptif, et des aires dites associatives. L'information concernant l'erreur est donc, par conséquent traitée, dans un premier temps, en mode intramodalitaire pour être, dans un deuxième temps, traitée en mode intermodalitaire. L'influence respective des entrées visuelles, proprioceptives, tactiles et vestibulaires ainsi que leur intégration a tout naturellement fait l'objet de nombreux travaux. Le système visuel assure, grâce aux visions centrale et périphérique, aux systèmes retino-tectal et geniculo-strié, ainsi qu'aux voies dorsale et ventrale du système visuel cortico-cortical la double fonction de localisation et d'identification des stimuli lumineux. L'influence de l'entrée visuelle sur le contrôle postural est déterminée par le quotient de Romberg (Njiokiktjien & Van Parys, 1976) qui se calcule par le rapport entre surface d'oscillation du centre de pression lorsque le sujet a les yeux ouverts et surface d'oscillation du centre de pression lorsque le sujet a les yeux fermés (multiplié par 100). La fermeture des yeux provoque alors une augmentation importante de la surface d'oscillation, faisant baisser ainsi le coefficient. Toutefois, plus que la suppression de l'entrée visuelle, sa perturbation, en modifiant par exemple la nature de la lumière (continue versus

stromboscopique) comme l'ont fait Amblard & Cremieux (1976), détermine une détérioration du contrôle de la posture. Néanmoins, on peut remarquer que la condition qui semble le plus dégrader le contrôle postural est celle qui consiste à demander au participant de garder les yeux ouverts dans le noir (Hafström *et al.*, 2001). Selon ces auteurs, les yeux étant ouverts, le système «s'attend» à recevoir de l'information et n'attribue donc pas immédiatement de poids supplémentaire aux autres modalités sensorielles. Cependant, lorsque des individus sont placés pour une durée longue (plus de 20 minutes) dans l'obscurité, ces derniers modifient sensiblement le contrôle de leur posture (Rougier, 2003) suggérant la possibilité de passer d'un contrôle à dominante visuelle à un contrôle vestibulo-kinesthésique. Par ailleurs, une scène visuelle en mouvement perturbera elle aussi la posture du sujet par le phénomène devection dont l'intensité dépend de celle des variables manipulées : surface de la scène, vitesse etc. (Dietz, 1992). De plus, lorsque le participant doit fixer une cible visuelle, la distance entre cette dernière et l'individu influe aussi sur les paramètres posturaux (Paulus, Straube & Brandt, 1984). Toutefois, le système visuel, à lui seul, ne permet pas de déterminer lorsqu'un mouvement est visuellement détecté, si celui-ci est dû à un déplacement (passif en particulier) de l'individu ou à un déplacement de l'environnement comme le montrent les expériences devection (Lee & Lishman, 1975), ce qui confirme, si cela était nécessaire, l'importance de l'étape d'intégration multisensorielle.

L'implication du système kinesthésique dans le contrôle postural a lui aussi été largement exploré en particulier à partir des expérimentations de vibration tendineuse et de manière plus indirecte, celles mettant en jeu la fatigue (Vuillerme, Danion, Forestier & Nougier, 2002). La définition même de ce système pose cependant quelques difficultés. En effet étymologiquement, son nom signifie la sensation (esthésis) du mouvement (kinè). Or, la kinesthésie, ainsi définie selon une approche fonctionnelle, intègre nécessairement les récepteurs musculaires, articulaires et tendineux mais aussi les récepteurs vestibulaires, tactiles, et en partie visuels (Berthoz, 1997). Et si l'on veut étudier l'influence relative des systèmes visuel et kinesthésique et que le premier intègre le second, les règles du raisonnement logique et de la méthodologie expérimentale telle que définie par Claude Bernard ne peuvent être appliquées. Dans ce débat, Roll (1994) propose plutôt d'intégrer la kinesthésie dans une connaissance plus globale des propriétés du corps, la somesthésie, qui intègre entre autres la proprioception (liée aux récepteurs musculo-articulaires), alors que McCloskey (1978), lui, donne une définition plus restrictive de la kinesthésie en la limitant aux récepteurs distribués dans le système musculo-articulaire. D'autres auteurs intègrent, dans une même perception fonctionnelle, le système kinesthésique (au sens de McCloskey, 1978) et le système tactile sous le nom de perception haptique (Gentaz, Baud-Bovy & Luyat, 2008). Paillard

(1976) distingue, quant à lui, un sens du mouvement (kinesthésie) et un sens de la position (statéthésie). Plus récemment, Gandevia, Refshauge & Collins (2002) proposent que la proprioception intègre en plus de la détection du mouvement, de la position et de la force, les aspects conscients du timing des commandes motrices. La neuroanatomie que l'on trouve dans tous les manuels classiques propose, quant à elle, en s'appuyant sur les récepteurs et voies spécifiques empruntées par le message nerveux, une distribution des systèmes sensoriels qui isole – tout au moins pour les premières étapes de traitement - les systèmes visuels d'une part, et proprioceptifs et tactiles d'autre part. Ces débats ne sont pas sans importance car à travers le problème des définitions se pose la question du lien extrêmement difficile à faire entre une kinesthésie fonctionnelle multimodale et l'étude de l'effet de chacune des modalités sur le contrôle postural. Dans ce cadre, l'utilisation des termes kinesthésie et proprioception comme homonymes ne clarifie pas le débat et la question semble loin d'être réglée. Cette confusion est particulièrement dommageable dans le champ théorique cognitiviste pour lequel comprendre le fonctionnement nécessite de distinguer clairement chacune des étapes. Qui plus est, le système kinesthésique est considéré à la fois comme sixième sens (celui du mouvement) (Berthoz, 1997) en plus des cinq sens « unimodaux » et comme sens premier dans la mesure où il peut être considéré comme celui qui va permettre la calibration des autres (Roll, 2003). De façon à évaluer l'influence spécifique des récepteurs musculaires sur la posture, le moyen utilisé donnant les résultats les plus éclairants reste, là encore, la stimulation par vibration tendineuse de muscles (mais non leurs antagonistes) en l'absence de vision (Roll & Vedel, 1982). La stimulation mécanique du tendon provoque l'étirement du muscle et par conséquent des fuseaux neuro-musculaires créant ainsi « l'illusion » d'une activité du segment concerné. Dès 1972, Eklund a montré que des vibrations tendineuses appliquées aux membres ou au tronc induisent des réactions posturales sous forme d'inclinaisons (dans le sens du muscle stimulé). Cependant, Hlavacka, Mergner & Krizkova (1996) observent à l'inverse que la vibration peut aussi induire une inclinaison dans le sens inverse du muscle stimulé, en l'occurrence le gastrocnémien, qui permet la flexion du genou et qui est très impliqué dans la fonction antigravitaire. Par ailleurs, l'application de vibration tendineuse a aussi été réalisée au niveau des membres supérieurs (Cordo, Gurfinkel, Bevan & Kerr, 1995), des muscles oculomoteurs (Roll, Roll & Velay, 1991) des muscles nucaux, dont les afférences proprioceptives informent quant à la position de la tête par rapport au tronc (Mergner, Huber & Becker, 1997) et provoque dans tous les cas des réactions posturales (Ivanenko, Grasso & Lacquaniti, 1999 ; Kavounoudias, Gilhodes, Roll & Roll, 1999). L'ensemble de ces études indique clairement que, dans le processus de retour d'information et de détection de l'erreur au cours de la régulation posturale, le système proprioceptif joue un rôle capital. Cependant, Isableu & Vuillerme (2006), après avoir observé que ce sont les

sujets qui ont la plus petite surface d'oscillation en situation normale qui sont les plus déstabilisés par une surface d'appui podal souple, suggèrent que l'influence des informations kinesthésiques dans le contrôle postural varie d'un individu à l'autre. L'influence de la mécano-réception cutanée, en particulier plantaire, dans le contrôle postural a, elle aussi, été abordée en anesthésiant localement les récepteurs impliqués dans cette modalité. La suppression de cette information a pour effet une augmentation de l'instabilité posturale (Thoumie & Do, 1996), en particulier en médiolatéral lorsque la vision n'est pas disponible (Meyer, Oddson & De Luca, 2004). L'autre méthode utilisée consiste à faire varier la nature de la surface d'appui sur laquelle se trouve le participant en les plaçant sur des supports en mousse tels que ceux utilisés en ré-éducation (Chiang & Wu, 1997 ; Isableu & Vuillerme, 2006) pour dégrader l'information somatosensorielle plantaire ou au contraire en stimulant ces récepteurs en plaçant les sujets sur des plaques recouvertes de petites billes (Okubo, Watanabe & Baron, 1980). Les résultats indiquent que dans le premier cas, le contrôle postural est perturbé alors que dans le second, la surface d'oscillations posturales diminue relativement à celle observée sur une surface lisse. La stimulation spécifique d'une partie de la plante du pied provoque systématiquement une inclinaison dans le sens opposé (vers l'arrière si la stimulation est faite sur l'avant du pied et controlatérale si la stimulation est appliquée sur le côté) semblant indiquer des mécanismes de correction d'origine plantaire (Kavounoudias, Gilhodes, Roll & Roll, 1999). L'autre technique de stimulation consiste à ajouter de l'information tactile en proposant au sujet de toucher du doigt une surface, sans pouvoir prendre appui (la force exercée au niveau du doigt doit être inférieure à 1 Newton), durant le maintien de la posture érigée (Holden, Ventura & Lackner, 1994). Dans cette situation, la surface de l'ellipse et la vitesse de déplacement du CdP diminuent. Néanmoins, dans ce cas précis, la stimulation employée n'est pas impliquée naturellement et directement dans le maintien de la posture lorsque l'on considère celle-ci dans sa plus stricte acceptation. Il s'agit plutôt d'un ajout d'information, non disponible lorsque l'on se contente de tenir debout. Par conséquent, cette méthode informe plus sur l'intégration sensorielle et sur l'ajout d'information que sur le rôle des mécano-récepteurs cutanés en eux-mêmes dans le contrôle postural.

Enfin, le dernier système sensoriel impliqué dans le contrôle postural, connu pour être à la fois le premier fonctionnel au cours de l'embryogenèse et stimulé en permanence (à l'exception des situations de microgravité), est le système vestibulaire qui permet de détecter les accélérations linéaires et angulaires du segment céphalique. Les difficultés techniques pour supprimer les stimulations détectées par le système vestibulaire et sa position anatomique font que l'exploration de son implication dans le maintien de la posture s'est principalement fait à travers l'étude de cas

cliniques. Si, dans ce cadre, un certain nombre d'études rapportent une détérioration de la régulation posturale chez des patients vestibulo-lésés (Allum *et al.*, 1998), cela ne signifie pas que l'influence des informations vestibulaires dans le contrôle postural chez la personne non pathologique est prépondérante, en particulier lorsque les autres informations sensorielles (visuelles, kinesthésiques) sont disponibles (Dietz, 1992). En effet, selon Fitzpatrick & McCloskey (1994), lors de la posture naturelle, les oscillations de la tête se font à des amplitudes qui n'atteignent pas les seuils d'activation des récepteurs vestibulaires. Par ailleurs, si elle n'est pas simple à mettre en place, la stimulation expérimentale du système vestibulaire est quand même possible. La stimulation galvanique, qui consiste à faire varier l'intensité du message vestibulaire grâce à l'application d'électrodes (anode ou cathode) sur les processus mastoïdes, induit une perception de l'axe gravitaire déviée et une perturbation de l'équilibre postural (Hlavacka, Krizkova & Horak, 1995; Hlavacka, Mergner & Krizkova, 1996). Ce lien entre perception de l'axe gravitaire et perturbation posturale avait déjà été observé par d'autres moyens. En effet, dès la fin des années quarante, Witkin (1950), en soumettant des participants à la force centrifuge (assis sur une plateforme tournant autour d'un axe) en l'absence de vision, observait une déviation posturale. Du fait de la rotation, l'accélération détectée par le système vestibulaire était la résultante de celle fournie par la gravité et de celle fournie par la rotation. Par conséquent, le sujet ayant l'illusion de pencher vers l'extérieur orientait son buste vers l'intérieur indiquant ainsi l'influence du système vestibulaire. Néanmoins, il faut noter que, dans ce cas précis, le sujet est assis et non debout et surtout que la situation expérimentale est assez éloignée d'une situation posturale écologique (au sens « naturelle ») dans la mesure où les valeurs des accélérations gravito-inertielles induites par la situation sont assez éloignées de celles quotidiennement vécues. L'ensemble de ces données indique clairement que chacune de ces modalités sensorielles influe d'une manière ou d'une autre sur la régulation posturale. Néanmoins, ces informations issues de différentes sources, bien que traitées dans un premier temps de manière unimodale, sont utilisées simultanément dans les processus de contrôle. Et si la part de chacune d'elles est importante, c'est après intégration de l'ensemble que le système de régulation posturale unique, intégré lui-même dans un système unique et global de traitement de l'information, générera la détection de l'erreur.

Cette surabondance d'information et de ses sources amène en effet à une redondance qui peut se traduire par un conflit intermodalitaire comme dans le mal des transports. Pour autant, cette redondance n'est pas inutile. Tout d'abord, elle permet d'assurer la posture en l'absence des informations issues d'une des modalités : par exemple, nous sommes capables, certes avec plus d'instabilité, de nous tenir debout dans le noir et les spationautes sont capables d'organiser leur

posture en l'absence de gravité. Néanmoins, si l'absence d'une des modalités sensorielles peut être palliée, leur importance relative semble hiérarchisée au profit de la vision comme le montrent les expérimentations menées par Nashner & Berthoz (1978). Dans celles-ci lorsqu'une plateforme mobile sur laquelle se trouve le sujet est déplacée mais que les indices visuels ne le signalent pas puisqu'une « boîte » fixée autour de la tête se déplace en phase avec le support, les auteurs n'observent aucune réaction posturale alors que si l'environnement est fixe (la « boîte » ne se déplaçant pas), une réaction posturale apparaît. Néanmoins, le plus grand intérêt de cette redondance sensorielle dans la régulation posturale semble tenir au fait qu'elle est en elle-même une source d'information. En 1995, Simoneau, Ulbrecht, Derr & Cavanagh ont testé l'influence relative et combinée des informations visuelles, vestibulaires et somatosensorielles. Bien que la méthodologie employée pour perturber les informations somato-sensorielles (comparaison entre des sujets atteints de neuropathies ou non) et vestibulaires (maintien de la tête droite ou inclinée vers l'arrière à 45°) puisse être largement discutée, les résultats obtenus renseignent tout à fait quant à l'intégration sensorielle dans la régulation posturale. La perturbation des entrées vestibulaires augmente l'instabilité de 4%, celle des entrées visuelles de plus de 40% et celle des entrées somatosensorielles de plus de 65%, ce qui donne lorsque l'on fait la somme des trois environ 110%. Or, lorsque les trois sont perturbées simultanément, l'augmentation de l'instabilité est de 250%. Les 140% manquant correspondent donc au fait que les trois informations sont données simultanément. Dit autrement, les informations recueillies et traitées par chaque modalité sensorielle sont ensuite fusionnées (Oie, Kiemel & Jeka, 2001; Oie, Kiemel & Jeka, 2002) et, en situation non pathologique ou artificiellement perturbée, c'est le fruit de cette fusion qui est utilisée pour détecter les erreurs au cours de la régulation posturale. Par ailleurs, l'ajout d'information supplémentaire à celles normalement disponibles durant la posture érigée amène aussi à une réduction des oscillations posturales. Comme évoqué précédemment, un contact digital (sans appui mécanique) sur une surface solide diminue, en position pieds l'un devant l'autre, les oscillations de 50% (Jeka & Lackner, 1995). Ce type de résultat est aussi observé lors de station unipodale (Holden, Ventura & Lackner, 1994) ou pieds joints (Clapp & Wing, 1999). Les données haptiques et celles fournies par la proprioception quant à la position du bras fourniraient des informations supplémentaires concernant les oscillations et permettraient alors de les diminuer et donc de réduire le coût énergétique. Cette proposition selon laquelle l'influence du «contact léger» (l'expression « light touch » est systématiquement utilisée dans les publications) se ferait à travers les informations données quant à une surface stable utilisée comme nouveau cadre de référence semble confirmée par le fait que l'augmentation de la surface de contact n'a guère d'effet alors que sa rigidité est une condition nécessaire à la réduction des oscillations (Lackner, Rabin & DiZio, 2001). Par ailleurs,

l'ajout de « contact léger » permet à des patients atteints de déficits sensoriels de compenser en partie celui-ci. Ainsi, chez des patients atteints de neuropathies superficielles des membres inférieurs, le « light touch » permet d'améliorer la régulation posturale, particulièrement lorsque la tâche posturale est difficile à réaliser, en l'absence de vision et avec un support podal étroit (Dickstein, Shupert & Horak, 2001). De même, chez des patients vestibulo-lésés, les performances posturales en l'absence de vision sont meilleures que celles de sujets non pathologiques placés dans la même situation mais sans contact digital (Lackner *et al.*, 1999). Cet ensemble de propositions suggère que le système détecteur de l'erreur, s'il peut s'en passer pour participer à la régulation de l'équilibre, peut aussi intégrer directement l'information donnant un cadre de référence nouveau en particulier lorsque la tâche posturale est difficile.

Avec la valeur de référence régulée, le schéma corporel et les messages détecteurs d'erreurs, les réactions posturales forment l'ensemble des processus permettant la régulation posturale. On entend par stratégie posturale les mécanismes musculo-squelettiques mis en jeu, sous contrôle du système de traitement de l'information, pour maintenir l'équilibre. Si les données recueillies via la posturographie concernant les déplacements du Centre de Pression informent quant à la cinétique, elles ne renseignent en rien quant à la cinématique. Or, le corps humain étant constitué de plusieurs modules articulés qui fonctionnent en synergie, il n'y a pas qu'une manière de faire avancer le centre de gravité ce qui amène à distinguer l'équilibre (le fait de tenir la projection du CdG dans le polygone de sustentation) de la posture (la manière de le faire) (Massion, 1984). Cette remarque n'est pas nouvelle non plus puisque, dans les travaux évoqués précédemment, Babinski en 1899 précisait que, lorsqu'il demandait à un patient de réaliser une dorsiflexion du tronc et du cou, celle-ci était accompagnée d'une flexion des genoux permettant de maintenir l'équilibre. Ces synergies apparaissent aussi, par exemple, lors des mouvements de respiration (Gurfinkel & Elner, 1973). La question est donc de savoir comment s'organise la réponse posturale face à des perturbations attendues ou non, face au grand nombre de possibilités qui sont mécaniquement disponibles ou, dit autrement, de déterminer si des patterns d'activation musculaires relativement stables sont mis en jeu. Dans ce domaine, les publications de Nashner & McCollum (1985) et de Horak & Nashner (1986) font figures de références, ne serait-ce que par le nombre de fois où elles sont citées, que ce soit pour s'en inspirer ou, au contraire, pour les remettre en cause comme le font Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999) par exemple.

Nashner & McCollum (1985) proposent d'analyser l'organisation posturale à partir d'un modèle à trois segments (jambe, cuisse, tronc) plus un (le pied reposant sur la surface d'appui), articulés dans le plan sagittal autour de trois points (cheville, genou, hanche) par trois paires de

muscles (abdominal / paraspinal, quadriceps / ischio-jambiers, tibial / gastrocnémien). Après une description formelle des différentes coordinations qui peuvent être mises en jeu et leurs conséquences mécaniques, ils proposent deux hypothèses. Selon la première, le nombre de muscles mis en jeu est limité et fonctionnent en synergie, induisant ainsi un nombre limité de stratégies de coordination. Selon la seconde, le mode de contrôle nerveux le plus souvent choisi est celui qui implique un minimum de calcul quant à la précision. En posant ces deux hypothèses, ces auteurs se situent tout à fait dans une approche cognitiviste et en posant la première, ils y intègrent la perspective « bersteinienne »¹⁷ de la simplification du contrôle. Trois stratégies sont mises en évidence en fonction des perturbations imposées (figure 2). Dans la première, qualifiée de « *stratégie de chevilles* », l'organisation posturale peut être définie comme un pendule inversé (autour de l'axe des chevilles) dans lequel le corps se comporte comme un bloc rigide. Le contrôle de la position du CdG sur l'axe antéro-postérieur est alors très simplifié (Fujisawa *et al.*, 2005). Cette stratégie est utilisée pour de faibles inclinaisons du corps, avec une surface d'appui large mais elle n'est pas utilisable lorsque les inclinaisons sont plus importantes pour des raisons mécaniques : le moment angulaire au niveau de la cheville est limité par la longueur du pied relativement à la hauteur (et la grandeur) du centre de masse. La deuxième stratégie mise en évidence est dite « *stratégie de hanche* » puisque c'est autour de celle-ci que s'organise la régulation posturale, et s'applique dans le cas de surface d'appui réduite ou de perturbations importantes en vitesse ou amplitude. Selon ces auteurs, ces deux stratégies sont distinctes d'un point de vue fonctionnel : l'une ou l'autre est utilisée et l'utilisation des deux simultanément, quand elle apparaît, conduit à l'échec de la régulation posturale : « *les sujets capables de mettre en oeuvre une pure stratégie de hanche réussissaient quasiment à chaque fois à maintenir leur équilibre sur la surface étroite, alors que ceux qui alternaient [entre de stratégie de hanche et cheville], réussissaient moins et perdaient l'équilibre dans 25 à 75% des cas* »* (p. 145). La stratégie de chevilles semble s'appliquer pour des faibles fréquences d'oscillation, inférieures à 0.2 Hz (Nashner, Shupert, Horak & Black, 1989) ou de faibles amplitudes, inférieures à 20° (McCollum & Leen, 1989) et celle de hanche lorsque les perturbations appliquées dépassent ces valeurs (moyennes). Par ailleurs, une troisième stratégie est envisagée, la stratégie « verticale ». Dans ce cas, l'objectif est d'abaisser le centre de gravité. Pour ce faire, les trois articulations (hanches, genoux, bassin) sont mises à contribution simultanément (figure 2). Enfin, une dernière stratégie pour conserver l'équilibre consiste à faire un pas dans la même direction que le déplacement du CdG.

17 Selon l'expression de Carrelo C., Turvey, M.T. & P.N. Kugler dans leurs commentaires qui suivent l'article de Nashner & McCollum (1985), p.151.

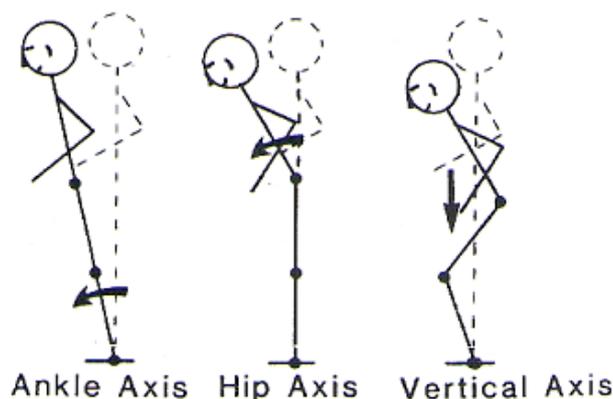


Figure 2 : *Stratégies de hanche, cheville et verticale selon Nashner & McCollum (1985)*

Les déterminants du passage d'une stratégie de cheville à une stratégie de hanche ont néanmoins été débattus car ils induisent un problème théorique non négligeable. En effet, au regard du cadre théorique cognitiviste, il s'agit de déterminer si ces deux stratégies correspondent à la mise en oeuvre de deux schémas radicalement différents ou s'il s'agit de variations d'un même schéma. Une réponse à cette question peut se trouver dans la proposition de Schmidt (1993) qui suggère que « l'unité de comportement », c'est-à-dire ce qui détermine le comportement, est nécessairement plus abstrait que le niveau des synergies musculaires et se situe donc au niveau des programmes, et que le choix des muscles mis en jeu dépend du programme et ne le définit pas¹⁸. Selon Kuo (1995) et Kuo & Zajac (1993), l'explication pourrait tenir aux coûts énergétiques : d'un point de vue biomécanique, la stratégie de cheville permettrait de maintenir à faible coût énergétique la posture face aux perturbations, ce qui est mis en évidence, selon ces auteurs, par le raidissement articulaire au niveau de la cheville observé lors de perturbations posturales. Néanmoins, ils signalent aussi que la pure stratégie de cheville n'existerait pas au profit d'une stratégie mixte pour minimiser ce qu'ils appellent l'effort « nerveux », c'est-à-dire le coût du contrôle. De plus, cette raideur, qui devrait pallier l'absence d'information visuelle, n'apparaît pas chez des participants non voyants (Rougier & Farenc, 2000), tout simplement car le coût de son maintien constant serait trop élevé. Par ailleurs, les travaux réalisés en l'absence de gravité (vols spatiaux) semblent indiquer une primauté des stratégies sur les synergies puisque si les premières restent stables tout au long du vol, les secondes se modifient (Lestienne & Gurfinkel, 1988). Toutefois, si les propositions de Nashner & McCollum (1985) sont tout particulièrement citées, d'autres travaux empiriques contredisent partiellement leurs résultats. Runge, Shupert, Horak & Zajac (1999) remettent en cause l'hypothèse de deux stratégies (hanche et cheville) clairement distinctes. En faisant varier la vitesse de déplacement vers l'arrière

¹⁸ En toute rigueur, la proposition de Schmidt évoquée ici ne concerne pas la posture à proprement parler mais le contrôle moteur en général.

de la plateforme sur laquelle les participants se tenaient, ils observent un continuum sur lequel la stratégie de hanche s'ajoute à la stratégie de chevilles mais n'observent jamais de « pure » stratégie de hanche. De leur côté Gatev, Thomas, Thomas & Hallett (1999) montrent que si durant le maintien de la posture « normale » les stratégies de chevilles dominent, la réduction de la surface d'appui induit un rôle plus important des mécanismes de hanche, tout au moins dans le plan sagittal. De plus, selon ces auteurs, le contrôle postural constant durant les oscillations permet de tenir à jour en permanence une représentation précise de la posture.

Si le fonctionnement de chacun des quatre grands éléments (valeur de référence régulée, schéma corporel, messages détecteurs d'erreurs, et réactions posturales) permettant le maintien de la posture érigé est parfois âprement débattu, le modèle dans ce cadre cognitiviste ne l'est par définition pas. D'autant que certaines études mettant en jeu la régulation posturale sont venues étayer l'hypothèse du système de traitement unique de l'information. En effet, si l'on a considéré pendant un temps que le coût attentionnel du contrôle postural était négligeable, des travaux, à partir du milieu des années quatre vingt, sont venus, en utilisant le paradigme de la double tâche appliqué à la posture, infirmer cette hypothèse (Kerr, Condon & McDonald, 1985). La difficulté d'allouer de l'attention à une tâche apparaît alors plus marquée lorsque la posture est difficile à maintenir, comme sur une surface réduite (Lajoie, Teasdale, Bard & Fleury, 1993) et varie en fonction de la nature de la tâche demandée (Kerr, Condon & McDonald, 1985). Par ailleurs, il apparaît que chez les personnes âgées la demande attentionnelle posturale, lorsque les entrées sensorielles sont perturbées (en l'absence de vision ou sur une surface molle), est plus importante que chez des participants jeunes (Teasdale, Bard, LaRue & Fleury, 1993). Certes, certains résultats ne permettent pas toujours de conclure de manière très tranchée (Stoffregen *et al.*, 2007), mais il n'en ressort pas moins globalement que la régulation posturale apparaît comme mettant en jeu des processus de traitement de l'information qui nécessitent des ressources attentionnelles (Woollacott & Shumway-Cook, 2002) qui doivent être partagées avec d'autres fonctions validant en cela l'hypothèse du canal de traitement unique. Cependant, la cohérence trouvée et le poids du cognitivisme dans les propositions de compréhension de la régulation posturale ne signifient pas que d'autres propositions théoriques, présentées plus tard, n'ont pas été faites. Mais une des grandes forces de cette hypothèse théorique est qu'elle trouve sa pertinence dans la physiologie nerveuse et la pathologie, parfois il est vrai à travers une co-justification circulaire.

En effet, on peut retrouver dans l'anatomie nerveuse un fonctionnement cybernétique. En plus des boucles réflexes locales qui, sous contrôle central assurent le nécessaire tonus musculaire, la régulation posturale est assurée par de multiples structures sous-corticales (striatum, thalamus

latéro-ventral, corps de Luys, substance noire, pallidum, noyaux rouges) du système extrapyramidal, associées au cortex (Paillard, 1986f, p. 21) pour ce qui est des voies efférentes, la voie finale commune étant le motoneurone alpha (Schmidt, 1993). Les motoneurones gamma, assurent, quant à eux, l'ajustement du fuseau neuro-musculaire à la longueur actuelle du muscle. Du côté des afférences, la neuro-anatomie permet de distinguer les voies propres à chaque système sensoriel impliqué dans la posture se projetant dans des aires corticales spécifiques avec des projections latérales sous-corticales. Cependant, il faut noter que les voies issues de l'appareil vestibulaire périphérique font exception puisqu'elles ne se projettent pas spécifiquement par une voie différenciée vers une « aire corticale vestibulaire » (bien que l'on attribue parfois à l'insula postérieure la fonction vestibulaire, Brandt, Dieterich & Danek, 1994), mais, après un relais dans les noyaux vestibulaires, vers des structures sous-corticales. Ce relais et ces projections s'expliquent sans doute par l'ancienneté phylogénétique de ce système sensoriel. En revanche, ces noyaux vestibulaires reçoivent des informations visuelles et proprioceptives. Par ailleurs, principalement à travers la pathologie, l'influence de chacun des quatre éléments impliqués dans la régulation posturale et leur interaction peut être mise en relation avec des composants biologiques du système nerveux. Cependant, le danger est grand de caricaturer les approches cognitivistes qui ramèneraient l'étude du fonctionnement humain à une forme de « néophrénologie » dans laquelle, à chaque zone du Système Nerveux Central (SNC) correspondrait une fonction. Au contraire, chacune d'entre elles est plutôt envisagée comme participant à de vastes réseaux fonctionnels (Mazoyer, 2002).

En ce qui concerne le rôle de la perception, les effets de déficits d'un système perceptif spécifique sur la posture ont été largement décrits. Si, dans le cas de la vision, des données issues de la pathologie ne peuvent être considérées comme équivalentes à celles obtenues chez des participants non déficients visuels dans la situation « yeux fermés », elles n'en sont pas moins très informatives. La cécité congénitale induit une posture très particulière caractérisée par une inclinaison de la tête vers l'avant ayant pour effet, dans deux tiers des cas, l'apparition de malformations de la colonne vertébrale (Martinez, 1977) souvent accompagnée d'une asymétrie de la marche ainsi que de fréquents balancements chez les jeunes aveugles. Cette position du segment céphalique s'explique sans doute par l'inclinaison de 30° des canaux horizontaux lorsque le voyant place l'axe des yeux à l'horizontal et les oscillations permettraient de stimuler le système vestibulaire (qui est un détecteur d'accélération et non de positions) pour pallier l'absence d'information visuelle (Berthoz, 1974). De même, chez les patients atteints de rétinopathie pigmentaire, maladie dégénérative qui atteint dans un premier temps la vision périphérique puis conduit à la cécité, les oscillations posturales sont connues pour être importantes (Geruschat & Turano, 2002).

Bullinger (2004), quant à lui, indique que le non accès à l'un des flux (visuel par exemple) amène l'enfant, pour générer les covariations de flux sensoriels nécessaires à la construction de l'image de son propre corps et à la localisation dans l'espace, à augmenter les flux qui lui sont disponibles. Dans une autre pathologie (cette fois, d'origine centrale), la maladie de Parkinson, dans laquelle la dégénérescence des voies dopaminergiques nigro-striales provoque les symptômes moteurs classiquement décrits (rigidité, tremblements, akinésie), des atteintes vestibulo-proprioceptives associées déterminent aussi des troubles de la posture qui peuvent être très spécifiques comme dans le cas rapporté par Sachs (1988) d'un patient qui penchait sans s'en rendre compte. Un autre argument des plus intéressants en faveur de l'hypothèse cognitiviste amené par les études sur les pathologies posturales, concerne les cas de « contraversive pushing ». Le syndrome du pousseur (« pusher syndrome ») apparaît chez des patients unilatéralement cortico-lésés et se caractérise par une poussée dans le sens opposé à l'hémisphère non atteint provoquant ainsi un déséquilibre et une tendance à tomber dans la direction du côté lésé. Paradoxalement, alors que l'erreur de ces patients dans l'évaluation de la verticale subjective posturale peut être importante (jusque 18°), ils ne présentent en revanche aucun trouble de la perception de la verticale visuelle subjective (Karnath, Ferber & Dichgans, 2000) suggérant l'existence au niveau central de différents systèmes de traitement de l'information gravitaire. Toutefois, la sévère héminégligence, c'est-à-dire le fait d'ignorer une moitié de son corps (controlatérale à la lésion, de l'hémisphère droit dans cette étude, Lafosse *et al.*, 2005), suggère inversement l'existence de processus d'ordre supérieur concernant l'image du corps et impliquant des sous-systèmes communs avec ceux mis en jeu dans l'équilibre postural. Ces résultats qui peuvent apparaître comme contradictoires ne le sont pas au regard des évolutions théoriques du cognitivisme. En effet, si les chercheurs qui s'inscrivent dans ce champ théorique savent s'appuyer sur des données issues de la physiologie nerveuse, ils ne prétendent pas être capables, à ce jour, de faire le lien direct entre des modèles fonctionnels psychologiques et des modèles structuraux issus des neurosciences. De plus, dans le cerveau, considéré comme système unique de traitement, des éléments qui le composent sont impliqués dans de nombreuses fonctions ce qui assure la cohérence de l'ensemble. Les développements de l'imagerie cérébrale (TEP, IRMf, MEGScan) montrent sans ambiguïté que les processus cognitifs mettent en jeu le plus souvent de grands réseaux impliquant souvent un grand nombre de structures sous-corticales et corticales (Houdé, Mazoyer & Tzourio-Mazoyer, 2002). De ce fait, il n'est pas surprenant que des déficits affectant le système moteur affectent aussi des processus supérieurs. Comme le signalait Paillard (1986c), la motricité met en jeu un grand nombre de structures qui fonctionnent, par définition, de manière circulaire (cybernétique) dont certaines, comme le cortex associatif ou des zones situées en avant du sillon central, sont aussi impliquées dans un grand nombre de fonctions exécutives. A ce

jour, le cognitivisme ne répond donc pas à l'ensemble des questions concernant la régulation posturale, n'est pas exempt de contradictions quant aux relations entre les éléments qui forment le système et peut être soumis à un certain nombre de critiques. Toutefois, il offre un modèle de compréhension cohérent qui s'appuie sur une extraordinaire quantité de faits expérimentaux. Formé à cette école, c'est tout naturellement, à travers un engagement ontologique cognitiviste, que les premiers travaux que j'ai dirigés dans le domaine de la régulation posturale se sont inscrits.

2.4. Contributions personnelles dans ce domaine¹⁹

Dans le cadre cognitiviste, la posture érigée peut être envisagée comme un des éléments de la motricité qui met en jeu, par définition, les mêmes mécanismes généraux que les autres processus moteurs. Elle s'intègre alors dans une organisation hiérarchique de traitement de l'information et s'organise au niveau musculo-squelettique en fonction des prescriptions, ces dernières dépendant de modèles internes et de retours d'information. Néanmoins, elle a pour spécificité d'être à la fois le support d'autres activités motrices et d'être utilisée au quotidien et ce dès la petite enfance. Fruit de la phylogenèse (mais aussi de l'ontogenèse) elle s'impose à tout Etre Humain et l'étude de son acquisition est très documentée (Assaiante, 2001; Bullinger, 2004)²⁰. Si l'on se réfère aux propositions de Schmidt (1993), un Programme Moteur Général (PMG) peut s'appliquer de manière indistincte à différents membres (même si la précision de l'exécution peut être affectée par l'usage d'un membre inhabituellement utilisé) : « *tout cela indique que le changement de membre ou de système effecteur peut se faire tout en préservant facilement les caractéristiques essentielles du patron du mouvement* »* (p. 106). Par exemple, étudier la posture monopodale est souvent considéré comme l'examen d'une posture érigée perturbée (Holden, Ventura & Lackner, 1994). De plus, que la posture soit naturelle (érigée, assise, etc.) ou non (monopodale, volontairement penchée, etc.) et quel que soit le moment de la vie durant lequel se fait son apprentissage, l'acquisition et l'intégration d'informations issues de différentes sources sont essentielles à un contrôle adaptatif (Massion, 1994; Woollacott & Shumway-Cook, 1990). Par conséquent, pour un individu ayant déjà acquis la posture érigée le problème principal face à une posture nouvelle n'est pas l'exécution du programme. En effet, nonobstant les limites purement musculaires que cela pourrait poser dans l'apprentissage et la mise en oeuvre, le participant est plus confronté à un

19 Les deux illustrations qui seront évoquées dans cette partie font références à deux publications (Croix, Chollet & Thouvarecq, 2010; Croix, Lejeune, Anderson & Thouvarecq, 2010) extraites de la Thèse de Doctorat, réalisée sous ma direction et soutenue par Gaëlle Croix en 2007.

20 Bullinger intègre dans ce qu'il appelle la « plateforme sensori-tonique » les aspects physique et émotionnel : « [la] plateforme sensori tonique [qui] se définit comme un état d'équilibre physique et émotionnel, point d'appui pour les fonctions instrumentales. Cet équilibre a un double statut : il est point d'appui matériel mais aussi point d'appui représentatif en ce sens que les sensations issues de l'action sont contenues émotionnellement » (pp. 113-114). Par ailleurs, si cet auteur fait beaucoup référence aux flux sensoriels, il les intègre dans une perspective très différente de celle envisagée dans l'approche écologique abordée plus loin.

problème de perception et d'utilisation de ces informations perceptives au service d'un système cybernétique qui s'appuie sur des programmes pré-existants qu'il faudra adapter et paramétrer. Néanmoins, force est de constater que pour vérifier expérimentalement ces propositions, vouloir mettre en jeu, des postures qui ne sont pas acquises au cours des premières années de la vie, place l'expérimentateur face à un problème simple mais qu'il n'est pas facile de dépasser : trouver la posture en question. Il existe pourtant des domaines dans lesquels le maintien d'une posture inhabituelle peut être à un moment donné un objectif en soi. Il s'agit des pratiques artistiques (telle que la danse) et sportives (telle que la gymnastique) ou à l'interface des deux (telles que les nouvelles activités circassiennes). En effet, dans ces activités, il n'est pas rare que soient réalisées des postures arbitraires, au sens où elles ne sont pas issues de la phylogenèse qui n'ont d'autre but que d'être réalisées de la manière la plus précise possible et pour elle-même (en gymnastique par exemple) ou pour exprimer symboliquement des émotions ou des états (en danse par exemple). Ces postures sont alors apprises tardivement (au regard de la posture érigée ou assise) et réalisées, selon l'expérience des participants, avec un niveau de maîtrise et d'expertise très variables. Comprendre les déterminants de la performance dans ce cadre offre alors un double intérêt. Cela permet tout d'abord, d'un point de vue épistémique, de mettre à l'épreuve des hypothèses théoriques proposées par le modèle cognitiviste, telle que la capacité à utiliser des processus de contrôle mis en oeuvre dans la posture érigée, dans le maintien des postures inhabituelles. Cela permet aussi de proposer aux pratiquants (et à leurs enseignants ou entraîneurs) une compréhension théoriquement argumentée de leur activité en vue de l'amélioration de la performance. Toutefois, considérer l'expertise sportive, en tant que variable indépendante, dans le cadre d'études exposées ci-dessous et au chapitre 3.4. n'est pas sans poser quelques problèmes d'ordre éthique. En effet, que le participant soit porteur ou non de pathologie ou qu'il soit caractérisé par une expertise spécifique, les règles de déontologie du psychologue s'appliquent tout autant. Ne pas nuire et respecter l'individu, qui sont les bases de l'éthique professionnelle, supposent de tenir compte, entre autres, du fait que ces études se déroulent dans un contexte particulier et que le sportif n'est pas de « la chair à expérimentation ». Cela induit alors des contraintes spécifiques (comme des moments d'expérimentations fixés en fonction des programmes d'entraînement), qu'il convient tout autant de respecter que celles tenues en considération lors de recherches menées dans le domaine de la pathologie par exemple. Il s'agit aussi d'informer et d'expliquer quant à nos objectifs et, dans la mesure du possible, de rendre compte des résultats aux intéressés individuellement. Et plus généralement, même dans des recherches dont l'objet n'est pas exclusivement la compréhension de l'activité ou celle de la performance sportive en elle-même, si des résultats peuvent être utiles pour les pratiquants ou leurs cadres, il semble justifié de les partager à travers des revues peut-être plus techniques.

Parmi les diverses possibilités offertes par les activités sportives en la matière, le choix s'est porté sur une figure gymnique, l'Appui Tendus Renversés (ATR), c'est-à-dire, l'équilibre sur les mains et ce, pour trois grandes raisons. Tout d'abord, cette posture est, selon les entraîneurs, un élément de base que l'on retrouve sur de nombreux agrès et qui pourtant pose de nombreux problèmes de maintien, même chez des pratiquants de longue date. De plus, la difficulté à tenir l'ATR ne vient visiblement pas (tout au moins chez des gymnastes) d'un problème de force des bras ou de gainage puisqu'il arrive que ces derniers ne tiennent pas l'équilibre alors qu'ils sont capables de marcher sur les mains ou de tenir en posture inversée les pieds contre un mur sur de longues durées (Croix, Thouvarecq & Baguelin, 2002). Leur difficulté tient donc bien au contrôle de l'équilibre et les entraîneurs sont intéressés par un éclairage quant à ce problème spécifique. La deuxième raison de ce choix tient à la similitude apparente entre posture érigée et ATR. Le second est simplement la première à l'envers. Cette similitude évite des problèmes méthodologiques et mécaniques que pourraient poser des comparaisons entre posture érigée et une posture radicalement différente comme une arabesque. Enfin, la troisième raison tient au fait que (sans doute pour les deux motifs évoqués précédemment), travailler sur l'ATR ne signifie pas partir d'une table rase et que l'étude de cette posture était un petit peu documentée dans la littérature scientifique. Si la phase de montée et d'établissement en ATR a aussi été étudiée (Nouillot, 1998; Nouillot & Natta, 2004), la phase de maintien de cet équilibre, en comparaison avec la posture érigée est celle la plus abordée (Clement & Rezzette, 1985; Rougier, Gelat & Caron, 1998; Slobounov & Newell, 1996). Des points communs entre ces deux postures ont été mis en évidence. Les muscles situés près du point de contact (ceux de la jambe en posture érigée et ceux des bras en ATR) exercent une forte activité. Dans les deux cas, le centre de gravité se place légèrement en avant de l'axe formé par les deux points de contact au sol et les oscillations se font majoritairement sur l'axe antéro-postérieur. De plus la stabilisation du regard influe sur les basses fréquences d'oscillation. Cela dit, les différences sont importantes. En ATR, la surface d'appui est plus petite et le centre de Gravité plus haut qu'en posture érigée; ces deux éléments induisent plus d'instabilité. Par ailleurs, en ATR, la position de la tête entre les bras limite la vision périphérique. Mais surtout, les muscles impliqués dans le maintien (bras et jambes) n'ont pas les mêmes caractéristiques en terme de résistance à la fatigue. Enfin, la position inversée impose la construction de nouveaux cadres de référence (Pozzo, Clement & Berthoz, 1988). L'influence des différentes modalités sensorielles dans le maintien de l'ATR a été abordée de manière plus ou moins directe. En ce qui concerne l'entrée visuelle, Clement, Pozzo & Berthoz (1988) ont montré qu'au delà de la présence ou non de cette information, la position du regard joue aussi un rôle fondamental. En effet, ils observent que les gymnastes fixent leur regard vers l'avant sur ce qui correspond environ à la limite antérieure de la projection verticale du CdG et que la

fixation des meilleurs parmi les participants est légèrement plus en avant que celle des autres. Selon ces auteurs, les gymnastes placent en fait leur regard sur ce qui doit être la limite des oscillations dorsales. De plus, lorsqu'ils demandaient aux sujets de fixer leur regard plus loin, les oscillations augmentaient, confirmant ainsi l'importance de « l'ancrage visuel », ce dernier étant associé à un déplacement compensatoire réflexe de l'oeil lors de déséquilibres (Asseman & Gahery, 2005). Selon Pozzo, Clement & Berthoz (1988), si les meilleurs gymnastes utilisent plus que les autres les extenseurs des avant-bras lors du maintien de l'ATR induisant moins d'oscillations et une inclinaison un peu plus sur l'avant, c'est dans le but de faciliter la prise d'information visuelle (ancrage) mais aussi tactilo-kinesthésique et vestibulaire. Clement & Relette (1985) ont, pour leur part, montré que, durant le maintien de l'ATR, les gymnastes experts inclinent le corps vers l'avant et qu'une extension forcée de la tête améliore le contrôle. En revanche une ventri-flexion forcée de la tête provoque la chute (Asseman & Gahery, 2005), et ce, quelle que soit la condition visuelle, indiquant l'importance de l'information proprioceptive d'origine spécifiquement nucale. Si les travaux précédemment cités suggèrent l'influence des informations tactilo-kinesthésiques autres que nucales, celles-ci n'ont pas été testées directement. D'autre part, en ce qui concerne l'exécution de la régulation, Kerwin & Trewartha (2001) montrent que chez les gymnastes non experts, le bassin contribue principalement à la régulation de l'ATR. De plus, chez les experts, le bassin est peu utilisé, au contraire de l'articulation du poignet et dans une moindre mesure des épaules. Selon ces auteurs, les gymnastes qui maîtrisent le mieux cet équilibre inversé mettent en jeu deux stratégies, de poignet et d'épaule, de la même manière qu'en posture érigée deux stratégies sont utilisées (cheville et hanches) suggérant clairement des analogies dans le mode de contrôle. Ces différentes données sur l'ATR mises en relation avec la difficulté évoquée plus haut qu'ont des gymnastes, même de bon niveau, à maintenir cet équilibre semble mettre en lumière l'influence toute particulière de la prise et du traitement de l'information. Néanmoins, celle-ci n'est que partiellement documentée en particulier dans les domaines non visuels et plurimodalitaires. Tout d'abord, l'influence des informations tactilo-kinesthésiques relativement aux informations visuelles n'a guère été évaluée. Si les processus de traitement de l'information mis en jeu en ATR sont les mêmes qu'en posture érigée lorsque les difficultés de la tâche sont élevées (Day, Steiger, Thompson & Mardsen, 1993), alors les informations visuelles devraient être premières. En revanche, leur absence devrait pouvoir être, au moins partiellement, compensée par celles fournies par d'autres modalités en particulier chez des experts en gymnastique qui sont connus pour être capables de passer d'un contrôle visuel à un contrôle somato-sensoriel plus facilement que les sédentaires et moins dépendre que des non experts des informations visuelles (Vuillerme *et al.*, 2001). De plus, l'apport d'information supplémentaire devrait faciliter le maintien comme le « light touch » (Holden,

Ventura & Lackner, 1994) en posture naturelle ou unipodale. Enfin, si la capacité à maintenir cet équilibre dépend en grande partie de « capacités perceptives » alors, tout comme dans la posture érigée (Isableu & Vuillerme, 2006), et sans préjuger du sens de celui-ci, un lien entre des caractéristiques perceptives générales et des compétences en ATR devrait apparaître. De façon à aborder ces questions, deux expérimentations plus une (qui reprend en partie les données de la première) ont été organisées. En fait, ces travaux avaient, à l'origine des objectifs plus pragmatiques, à savoir comprendre l'origine des difficultés que rencontrent les gymnastes, mêmes aguerris dans le maintien de l'ATR, mais elles permettent aussi d'illustrer comment, à travers une habileté particulière peut se poser, du point de vue cognitiviste, la question de l'existence de l'utilisation d'un même processus de traitement d'un acte moteur à un autre, les deux pouvant être considérés comme analogues.

Dans la première étude (Croix, Chollet & Thouvarecq, 2010), dont l'objectif était d'évaluer la contribution relative des informations visuelles et somato-kinesthésiques en fonction du niveau d'expertise, des gymnastes féminines ont été réparties en deux groupes, Expertes (E) et Non Expertes (NE), en fonction de leur niveau de compétition, du nombre d'années de pratique, de l'ancienneté de celle-ci mais homogènes en âge et en anthropométrie, et toutes capables de tenir l'ATR le temps d'un essai (comme vérifié lors du test d'inclusion). Elles devaient réaliser sur une plate-forme posturographique cet équilibre durant 10 secondes. Quatre conditions expérimentales ont été mises en place et trois essais exécutés pour chacune d'entre elles. Ces quatre conditions correspondaient au croisement de deux variables indépendantes (VI). La première VI était l'entrée visuelle à deux modalités : yeux ouverts (V) et yeux fermés (NV). La seconde VI était l'entrée tactilo-kinesthésique à deux modalités : surface ferme (F), c'est -à-dire directement sur le plateau de la plate-forme et surface souple (S), condition pour laquelle un tapis de mousse, du type de ceux utilisés en ré-éducation, était employé. La variable dépendante était la surface de l'ellipse de confiance à 90% des déplacements du Centre de Pression (CdP). Cette variable renseigne quant à la variabilité des déplacements du CdP dont l'augmentation traduit une baisse de la performance posturale (Asseman & Gahery, 2005; Vuillerme & Pinsault, 2007). L'idée première était, pour le traitement des résultats, d'appliquer une ANOVA à trois facteurs (à mesure répétée pour les deux derniers : Expertise(2) X Vision(2) X Surface(2)). Cependant, et c'est en soit un résultat, il est apparu que les non expertes étaient incapables de tenir l'ATR en condition NV et chutaient dès la fermeture des yeux. Par conséquent, deux analyses séparées ont dû être réalisées. La première évaluait l'effet de l'expertise, de la surface et leur interaction. La seconde qui n'a pu être réalisée que chez les expertes évaluait l'effet de la vision, de la surface et leur interaction. Par ailleurs, pour chacun des

deux groupes les corrélations d'une condition à l'autre et les corrélations intra-classes ont été calculées de façon à évaluer la stabilité des performances des gymnastes. Comme attendu, les résultats indiquent que la surface d'oscillation du CdP des experts est significativement moins grande que celle des non experts et que, quel que soit le groupe, elle augmente significativement lorsque les participantes sont placées sur la surface souple, sans effet d'interaction entre les deux variables. En ce qui concerne spécifiquement les expertes, l'absence de vision faisait aussi augmenter la surface d'oscillation du CdP mais aucun effet d'interaction entre condition de vision et condition tactilo kinesthésique n'est apparu. De plus, chez ces dernières, la suppression de l'entrée visuelle augmente la surface d'oscillation du CdP de 59%, la perturbation somato-kinesthésique de 33% et l'application concomitante des deux de 144%. Enfin, si pour les expertes les performances étaient corrélées d'une condition à l'autre, ce n'était pas le cas pour les non expertes. Par ailleurs, les tests réalisés en condition érigée naturelle (non perturbée) chez ces mêmes sujets n'indiquent pas d'effet de l'expertise sur la surface d'oscillation du CdP ni de corrélation significative entre les performances observées dans ces deux conditions posturales. Ce dernier résultat est cohérent avec ceux rapportés par Vuillerme *et al.* (2001) et Vuillerme & Nougier (2004) selon lesquels en posture érigée non perturbée, il n'existe pas de différence significative entre gymnastes et non gymnastes pas plus qu'il n'y en a entre judokas et non judokas (Paillard, Costes-Salon, Lafont & Dupui, 2002). Autrement dit, développer une expertise à maintenir une posture spécifique ne permet pas d'améliorer la régulation de la posture naturelle, ne serait-ce que par effet plafond : nous sommes tous (hors pathologie ou vieillissement) des experts du maintien de notre posture. Par ailleurs, le fait qu'en ATR, lorsque la vision est disponible, la perturbation tactilo-kinesthésique induise chez les deux groupes une augmentation de la surface d'oscillation du CdP sans interaction avec la variable expertise, montre que cette modalité n'est pas, en elle-même, comme pour la posture normale (Vuillerme & Pinsault, 2007; Vuillerme *et al.*, 2001) la source principale de difficulté à tenir la posture inversée. En revanche, l'utilisation de la modalité visuelle discrimine les niveaux d'expertise puisque, les yeux fermés, les non expertes sont tout simplement incapables de tenir l'ATR. Les expertes sont donc caractérisées par leur capacité à se passer de cette modalité connue pour être fondamentale dans la régulation de la posture érigée lorsque la tâche est rendue difficile. Elles sont donc, comme en posture naturelle (Vuillerme *et al.*, 2001), plus capables de passer d'un contrôle visuel à un contrôle vestibulaire et somato-kinesthésique. De plus, la présence de corrélations significatives d'une modalité à l'autre uniquement chez les expertes amène à supposer que le passage pour ces dernières d'une modalité à l'autre, s'il détériore la qualité de la performance, ne modifie pas fondamentalement les processus de régulation alors que chez les non experts, l'utilisation des modalités non visuelles n'est pas encore stabilisée. L'ensemble de ces résultats

montre donc que si des processus perceptifs communs existent bien entre posture érigée et ATR, le passage de l'un à l'autre ne se fait pas d'un bloc, et comme le proposaient Asseman, Caron & Cremieux (2004), on ne peut pas dire qu'un transfert stricto-sensu d'une posture à l'autre existe. Les gymnastes, pour cette posture spécifique, mettent en jeu dans un premier temps une régulation qui s'appuie sur la vision puis seulement plus tard, deviennent capables de passer à un contrôle non visuel. Par ailleurs le fait que, chez les experts, le pourcentage d'augmentation de la surface du CdP lorsque la vision et l'information tactilo-kinesthésique sont perturbées soit supérieur à la somme des pourcentages d'augmentation lorsque chacune des deux l'est, comme cela avait été observé en posture érigée (Simmoneau *et al.*, 1995), suggère là aussi que les systèmes communs supérieurs d'intégration mis en jeu durant le maintien des deux postures existent.

Dans une deuxième étude, cette proposition selon laquelle des processus perceptifs supposés communs mis en jeu dans la posture érigée et inversée a aussi été abordée mais cette fois-ci sous l'angle de l'ajout d'information. Comme évoqué précédemment, il est connu qu'un contact léger c'est-à-dire sans effet mécanique (Holden, Ventura & Lackner, 1994) induit une diminution de la surface d'oscillation du CdP (Jeka & Lackner, 1995) ou compense l'effet de perturbations posturales induites par les vibrations tendineuses (Lackner, Rabin & DiZio, 2000) ou par des pathologies (Lackner *et al.*, 1999). Qu'un effet du « light touch » soit observé indifféremment dans ces divers cas semble indiquer que cette capacité à utiliser une information sensorielle supplémentaire, est une caractéristique du système. Autrement dit, ce dernier peut intégrer directement une information supplémentaire et s'en servir dans l'adaptation de la posture en relation avec le modèle interne sans pour cela devoir apprendre à travers de multiples répétitions à le faire. Cette proposition peut paraître légèrement contradictoire avec les propositions de Schmidt (1993) quant à l'importance de la répétition puisque, au quotidien, nous n'utilisons pas en permanence le « light touch ». Deux explications peuvent être alors données. La première consiste à considérer que si nous ne l'utilisons pas régulièrement, la référence incluant le contact léger a été acquise dans le passé et reste disponible en mémoire. Son non usage est simplement lié au fait que, dans les situations habituelles, la redondance est suffisante en matière d'information sensorielle et que l'Homme réserve la mécanoréception cutanée en particulier digitale aux tâches supraposturales. L'autre explication consiste à considérer que la référence interne n'est pas codée en fonction de modalités perceptives mais à un niveau plus abstrait pouvant alors intégrer des informations intéro et extéroceptives de différentes natures comme celles issues du « light touch » ou des gravicepteurs du tronc dont l'existence a été déduite sans pour autant être directement décrits (Mittelstaedt, 1995; Mittelstaedt, 1996). La deuxième proposition semble, tout au moins en partie, validée par les travaux de Chen, Metcalfe,

Jeka & Clark (2006) qui concernent des aspects développementaux de la posture. Ces auteurs se sont intéressés à l'effet de l'acquisition de la marche sur la posture assise chez de jeunes enfants. Ils ont mesuré mensuellement les indices posturaux classiques (amplitude, variabilité, etc. du CdP) avec ou sans contact léger chez des enfants, depuis l'acquisition de la posture assise jusque neuf mois après l'acquisition de la marche. L'effet du « light touch » n'apparaît pas chez ces enfants excepté durant la période d'apparition de la marche (ou juste avant celle-ci) durant laquelle une augmentation de la valeur de l'ensemble des indices est aussi observée. Les auteurs suggèrent alors que, durant cette période de transition de la position assise à la position debout, les enfants recalibrent le modèle interne en vue de la nouvelle posture. Chez le jeune enfant, l'utilisation de cette information supplémentaire serait donc limitée à la réorganisation des modèles de référence lors d'une perturbation (ici, les modifications liées au développement). Une telle éventualité serait là aussi un argument en faveur d'un effet sur des processus de haut niveau.

Pour aborder cette question chez l'adulte, la difficulté est, à nouveau, de trouver une posture inédite, mécaniquement cohérente avec la posture érigée, et pour laquelle le « light touch » n'a pas été utilisé dans le passé. Dans une étude réalisée sous ma direction (Croix, Lejeune, Anderson & Thouwarecq, 2010), l'effet du contact léger durant le maintien de l'ATR a été évalué. Au-delà de l'intérêt évoqué plus avant, utiliser expérimentalement cette posture offre aussi la garantie que le « light touch » n'a jamais été utilisé dans le passé comme le confirme les réponses données par les participantes à cette question. Huit gymnastes féminines, les mêmes que celles du groupe expert de l'étude évoquée précédemment, devaient maintenir 10 secondes l'ATR dans quatre conditions correspondant au croisement de deux variables indépendantes (i) yeux ouverts ou fermés et (ii) avec ou sans contact léger. Ce dernier était donné par l'apposition du majeur et de l'index de l'entraîneur (femme) sur la cuisse du sujet sans que ce dernier ne puisse prendre appui dessus. Les données posturographiques recueillies pour qualifier la stabilité et la quantité d'activité déployée pour le maintien étaient la longueur du déplacement du CdP sur les axes latéraux et antéro-postérieurs ainsi que sa vitesse moyenne de déplacement. Un effet significatif de la vision, du « light touch » et un effet d'interaction sur la longueur du déplacement sur l'axe medio-latéral ont été observés. Globalement, les participantes étaient plus stables les yeux ouverts que fermés, en présence du contact qu'en son absence et, dans la condition avec vision ET contact, la stabilité était significativement meilleure que dans les autres conditions alors que, inversement, elle était significativement moins bonne en l'absence de vision et « light touch » que dans les autres conditions. Sur l'axe antéro-postérieur, les mêmes effets principaux (dans la même direction) et d'interaction ont été observés et, dans la condition sans vision ni contact, l'instabilité était

significativement plus grande que pour les autres conditions. En ce qui concerne la vitesse de déplacement du CdP, là aussi des effets des deux variables indépendantes ont été observés. Les vitesses de déplacement étaient moins grandes en présence de vision ou de contact léger. Par ailleurs, un effet significatif d'interaction, une vitesse significativement plus grande en condition yeux fermés sans contact et, significativement plus petite en condition yeux ouverts et avec contact, que dans les autres ont été mesurées. L'effet de la vision n'est pas une surprise dans la mesure où il avait été décrit à travers l'ancrage visuel il y a une vingtaine d'années (Clement, Pozzo & Berthoz, 1988). En revanche, l'effet du « light touch » sur la vitesse de déplacement et sur la longueur du déplacement du CdP (sur les deux axes) est très similaire à celui observé en posture érigée (Clapp & Wing, 1999; Jeka & Lackner, 1994) suggérant des processus communs. De plus, l'effet est particulièrement important lorsque la vision est supprimée comme dans la posture naturelle (Vuillerme & Nougier, 2003). Toutefois, en l'absence de perturbation visuelle, l'effet du « light touch » ne s'exprime que sur l'axe médio-latéral. Dans la mesure où le contact était donné sur le côté de la cuisse il paraît logique qu'il informe plus quant aux oscillations latérales qu'antéro-postérieures comme c'est le cas lorsque la posture érigée est difficile (talon contre orteil) à maintenir (Rabin, Bortolami, DiZio & Lackner, 1982). Mais il est surtout remarquable que les participantes ont utilisé cette source d'information immédiatement sans phase d'apprentissage préalable. Il ne s'agit pas alors d'utiliser une référence mémorisée mais bien d'intégrer de nouvelles informations dans un niveau de traitement d'ordre supérieur, c'est-à-dire, non spécifiquement « modalité dépendant ». Par conséquent, et si l'on admet l'hypothèse de la mise en oeuvre d'un processus commun dans la régulation des deux postures, il apparaît que ce dernier concerne un haut degré d'abstraction ce qui est cohérent avec les travaux cités précédemment.

Enfin, la troisième étude réalisée sous ma direction dans ce domaine s'est intéressée aux liens entre aspects génériques de la perception et contrôle de l'ATR (Croix, Chollet & Thouvarcq, 2010). En fait, il s'est agi de mettre en relation les résultats obtenus chez des sujets experts et non experts lorsque les conditions visuelles et somato-kinesthésiques étaient manipulées (présentées plus haut) avec les résultats obtenus chez ces mêmes participantes dans des tests de Dépendance / Indépendance à l'égard du Champ (DIC). Witkin (Witkin *et al.*, 1954), dans les années quarante et cinquante, en s'intéressant aux contributions visuelles et posturales dans la perception de la verticale subjective a montré, en utilisant différents dispositifs tels que le Rod and Frame Test (RFT), le Tilting Room Tilting Chair Test (TRTCT) et le Rotating Room Test (RRT), qu'en ce domaine, certains sujets utilisaient préférentiellement des indices visuels (dépendants à l'égard du champ visuel, DC), que d'autres, au contraire, utilisaient préférentiellement des indices posturaux

(indépendants à l'égard du champ visuel, IC). De plus, la plupart, les sujets pouvaient se répartir sur un continuum de dépendance / indépendance à l'égard du champ (DIC). Witkin apporta ainsi une contribution fondamentale à la psychologie différentielle et à la naissance de tout un champ de recherche (Witkin *et al.*, 1962). Ces caractéristiques peuvent aussi être retrouvées dans des tests mettant en jeu la capacité des sujets à discriminer, dans des figures, des formes géométriques encadrées dans un fond (Witkin, 1950) qui existent en version pour jeunes enfants (Coates, 1972) ou pour passation collective (Oltman, Raskin & Witkin, 1985). La mesure de cette DIC est, en général, réalisée avec un dispositif portable, le Rod and Frame Test (RFT) portable (Oltman, 1968). Il s'agit pour le participant de replacer à la verticale (relativement à la gravité), sans repères visuels contextuels, une baguette plus ou moins inclinée entourée d'un cadre lui-même plus ou moins incliné. Ce type de dispositif a été aussi développé pour des informations visuelles en mouvement, le Rod and Disk Test (RDT), dans lequel le cadre est remplacé par un disque tournant (Isableu, Ohlmann, Cremieux & Amblard, 1998) et selon Dichgans, Held, Young & Brandt (1972), les deux dispositifs distinguent des erreurs de même nature. Selon Ohlman (1990a, 1990b, 1990c) et Ohlmann & Marendaz (1991) la DIC s'explique par les processus vicariants (Reuchlin, 1978), c'est-à-dire le fait que pour nous adapter à une situation, nous disposons d'un répertoire de processus substituables les uns aux autres mais plus ou moins évocables. Cette évocabilité varie d'un individu à l'autre en fonction principalement de l'histoire de l'individu en éventuelle interaction avec des caractéristiques génétiques (Huteau, 1987). Dans le cas du RFT, la situation perceptive créée par la présence du cadre incliné autour de la baguette qu'il doit replacer verticalement, va induire, chez certains sujets, l'utilisation d'indices (de cadres de références) posturaux alors que, chez d'autres, ce ne sera pas le cas; ces derniers seront donc plus sensibles à l'inclinaison du cadre et feront donc plus d'erreurs dans le remplacement à la verticale. Ohlmann (1990b), s'appuyant sur le fait que la régulation posturale et la perception de la verticale s'appuient sur les mêmes modalités sensorielles, postule l'existence d'un lien entre stabilité posturale et DIC. Son hypothèse est confirmée par les travaux de Bonan *et al.* (2006) qui ont montré une meilleure stabilité posturale chez des sujets IC, mais la généralisation de ces résultats pourrait être largement discutée dans la mesure où ils ont été observés chez des patients hémiplésiques. Ce lien entre DIC et posture dans le sens d'une meilleure stabilité chez les participants IC a en revanche été observé chez des sujets non pathologiques (Isableu, Ohlmann, Cremieux & Amblard, 1997). La DIC serait alors un témoin de préférences perceptives globales dans un système de traitement unique. Dans ce cas, et si les mêmes processus sont mis en jeu dans le maintien de la posture érigée et de l'ATR un lien entre performance dans le maintien de ce dernier et DIC à travers des corrélations ainsi qu'une discrimination des groupes au travers de leur dépendance / indépendance à l'égard du champ devraient apparaître. Les

participantes issues des deux groupes (Experts / Non Experts) dont les performances posturales en ATR avaient été mesurées lors de quatre conditions (avec et sans vision, sur une surface souple ou dure), ont passé le test du RFT au cours de 16 essais faisant alterner selon un ordre pseudo-aléatoire les orientations du cadre et de la baguette (18° d'orientation pour les deux), dans sa version classique (Zoccolotti, Antonucci & Spinelli, 1993). L'erreur absolue, c'est-à-dire sans tenir compte de sa direction moyenne au cours des 16 essais était la variable dépendante. Les résultats présentés plus avant indiquaient tout d'abord une différence significative entre les performances (surface du CdP) des experts et non experts et dans le test de DIC, ces dernières étaient plus dépendantes à l'égard du champ. De plus, les performances de l'ensemble des gymnastes des deux groupes en ATR non perturbé (avec vision sur surface dure) et au test du RFT sont significativement corrélées. Par ailleurs, lorsque la vision n'est pas disponible (uniquement pour les experts puisque les non experts ne tiennent pas) le même type de corrélation est observé. Globalement, meilleures sont les gymnastes dans le maintien de l'ATR, moins elles sont dépendantes à l'égard du champ visuel, ce qui est cohérent avec les conclusions de Isableu, Ohlmann, Cremieux & Amblard (1997) pour la posture érigée. La mise en relation de ces résultats conforte, là encore, l'hypothèse de l'existence d'un processus commun à la régulation posturale quelle que soit la condition d'exécution de celle-ci. Par ailleurs, il peut être noté que nos résultats sont cohérents avec la littérature puisque, globalement, les sportifs sont en général moins dépendants à l'égard du champ que les non sportifs (Brady, 1995) tout comme le sont spécifiquement les danseuses (Golomer *et al.*, 1999; Nyborg & Isaksen, 1974). Toutefois, ces conclusions sont parfois contredites dans le cadre de certains sports comme le tennis (Barrel & Trippe, 1975) et surtout cela ne permet pas de dire si ces individus sont plus indépendants parce que sportifs ou l'inverse.

Partir du particulier pour valider le général est, bien sûr, épistémologiquement, et pour le dire en termes euphémiques, pour le moins discutable et tel n'est pas l'objet du propos. Néanmoins, quand l'application d'un modèle à un cas particulier fonctionne, cela tend plus à le conforter qu'à l'invalider. Pris dans leur ensemble, les résultats des deux études (plus une) présentés ci-dessus confortent, à leur mesure, la pertinence de l'hypothèse cognitiviste telle que proposée dans une partie de la littérature, dans le domaine de la régulation posturale. Comme postulé, on retrouve dans la régulation de l'ATR des processus identiques (tout au moins pour les aspects perceptifs) à ceux qui gouvernent celle de la posture érigée, ainsi que des caractéristiques perceptives générales mises en oeuvre par les participants. En remontant les étapes qui partaient de l'hypothèse cognitiviste appliquée à un cas particulier, la motricité, puis appliquée à un cas particulier de la motricité, le contrôle postural, le poids de cette proposition théorique ou plus précisément ontologique s'en

trouve, encore une fois à la mesure des résultats, renforcé dans son ensemble. Autrement dit, si l'hypothèse générale de l'analogie entre deux systèmes (l'ordinateur et l'Homme) de traitement de l'information à capacités limitées qui fonctionnent comme un canal unique de traitement (Welford, 1977) est posée puis appliquée par étapes successives à différents niveaux de traitement jusqu'à une activité motrice spécifique, la régulation posturale, les hypothèses qui découlent se trouvent validées par les faits expérimentaux (Roth, 1988). En ce sens, le cognitivisme apporte une compréhension du fonctionnement humain validée par des faits ce qui la rend alors tout à fait pertinente pour servir de base à la prescription d'outils « technologiques », au sens application de connaissances théoriques issues d'une compréhension du monde en vue d'une production, comme la ré-éducation motrice ou posturale, l'apprentissage, l'ergonomie ou encore la performance sportive.

2.5. Limites des approches cognitivistes.

Si le modèle cognitiviste offre une compréhension acceptable de ce qu'est un Homme en général et en mouvement en particulier, s'il se trouve validé par un grand nombre de faits expérimentaux, il n'est pour autant pas exempt de faiblesses ni à l'abri d'un certain nombre de critiques fondées. Développer l'ensemble de celles-ci, à supposer que les compétences requises soient disponibles, nécessiterait bien plus que ce document. Par conséquent, certaines, pourtant fondamentales comme la question de la conscience, seront ici ignorées et seules quelques unes seront abordées qui concernent plus spécifiquement la motricité et le contrôle postural. L'objectif est simplement de montrer que des remises en cause de ce modèle ne se contentent pas d'être de principe et ne manquent pas nécessairement de pertinence. Par ailleurs, certaines limites (la nécessité de la représentation dans la motricité par exemple) ne seront pas présentées dans ce chapitre car fondatrices de travaux proposant des cadres théoriques alternatifs au cognitivisme abordés par la suite.

La première critique que l'on peut envisager concerne le problème d'un raisonnement utilisé pour répondre à une question fondamentale posée par la motricité. Chez l'Être Humain, la quantité de muscles et de degrés de liberté mis en jeu est tellement grande qu'il faut bien expliquer comment ce dernier arrive à s'organiser pour produire une habileté motrice. La réponse, en fait rarement explicite et le plus souvent sous-tendue comme une évidence, tient dans l'existence d'un système supérieur qui contrôlerait le système musculo-squelettique, à travers les programmes moteurs. Schmidt (1993), en présentant le chapitre consacré à la production du mouvement, pose d'emblée l'existence du programme moteur et fait le lien direct avec son support, le système nerveux : « *ce chapitre est centré sur la façon dont le système nerveux central est fonctionnellement organisé, avant et pendant l'action, et sur la façon dont cette organisation contribue au contrôle du*

mouvement en cours » (p. 86). D'ailleurs, s'il revient sur l'opposition entre programme en boucle ouverte et programme en boucle fermée, il ne met pas en question l'existence du programme moteur en lui-même. Et force est de constater que, en s'appuyant sur l'invariance des phases temporelles relatives qui spécifient un programme moteur généralisé, des résultats expérimentaux valident l'hypothèse dans la réalisation de mouvements de pronation / supination (Carter & Shapiro, 1984) ou dans la marche vers l'avant ou l'arrière (Grasso, Bianchi & Lacquaniti, 1998). Toutefois, cela revient à déplacer le problème. Pour expliquer comment est organisé quelque chose de compliqué (la motricité), on fait appel à une instance supérieure de contrôle, elle-même encore plus compliquée, les programmes moteurs et une machine à traiter de l'information symbolique. Par conséquent, selon la logique proposée il faudrait que cette instance de contrôle soit elle-même contrôlée par une instance encore supérieure encore plus compliquée, et ainsi de suite jusqu'à l'infini ! Dans ce raisonnement, l'alternative à la recherche d'une infinie complication (et non complexité), dont la nature paraît difficilement concevable, consiste à trouver l'argument qui justifierait l'arrêt de cette remontée logique, ce dernier restant sans doute à trouver. Une piste se trouve peut-être dans les capacités d'auto-organisation du système nerveux central et dans sa plasticité telle que proposée par Paillard (Paillard, 1986a). Toutefois, et sans préjuger de l'impossibilité de le faire, il reste à argumenter la raison pour laquelle les capacités d'auto-organisation du système s'appliqueraient à certains niveaux de fonctionnement de celui-ci et non à d'autres.

Par ailleurs, se pose, dans la production et le contrôle moteurs (mais pas seulement), le problème de l'explosion calculatoire, au regard du nombre de degrés de liberté qu'il faut coordonner afin d'obtenir un système contrôlable, soit approximativement 10^2 au niveau articulaire, 10^3 au niveau musculaire ou encore 10^{14} dans l'espace neuronal (Newell, 1996). D'un point de vue plus fonctionnel, la métaphore du programme moteur pose le problème de la quantité d'information à traiter. En effet, si le modèle conceptuel de programme moteur généralisé réduit considérablement le nombre de programmes à stocker, la quantité de paramétrages potentiels et de schémas de reconnaissance à mémoriser reste, quant à elle, quasiment illimitée et pose à nouveau la question de l'explosion combinatoire (Minsky & Papert, 1969). Certes, les capacités (ou limites) de la mémoire à long terme restent largement ignorées, comme le montre l'étude réalisée par A. Luria au début du vingtième siècle (Luria, 1995, ré-édition) traitant, il est vrai, de processus cognitifs assez éloignés de la motricité, mais à supposer qu'elle soit capable de tout stocker un autre problème se pose. Comment accéder à l'information utile dans une telle masse dans les délais contraints dans des actions motrices de type sportif par exemple ? En effet, dans la métaphore informatique, la recherche d'information, quelle que soit la nature de son stockage, suppose un coût temporel. De

plus, que ce soit dans l'exécution d'une tâche de pointage manuel (Adamovitch *et al.*, 2001) ou de prononciation (Gracco & Abbs, 1986), l'application d'une perturbation au cours de la réalisation n'empêche pas nécessairement cette dernière. Dans ce cas, une compensation qui se traduit par l'augmentation de l'activité d'un autre effecteur assurant l'équivalence motrice suggère que la programmation n'est pas séquentielle. Face à cette question Feldman & Levin (1995) proposent un modèle basé sur des caractéristiques physiologiques du système moteur et dans lequel le coût est largement réduit puisqu'il ne s'agit plus de programmer pas à pas les déplacements mais d'atteindre un point d'équilibre en fonction de cadres de références hiérarchiquement organisés (Ghafouri, Archambault, Adamovich & Feldman, 2002). Néanmoins, ces propositions semblent contredites par des observations réalisées sur une patiente désafférentée (Larue *et al.*, 1992).

Par ailleurs, force est de constater qu'il existe quelques contradictions entre le modèle théorique cognitiviste et certains faits empiriques. Seules deux seront citées ici à titre d'exemple, l'une dans le champ de la perception et l'autre dans celui de la régulation posturale. La première concerne la perception, visuelle en l'occurrence, et certains aspects neuro-anatomiques. Il est commun de considérer que l'information visuelle captée et transduite par la rétine est transmise, via le nerf optique, vers les corps genouillés latéraux (au niveau thalamique) puis vers le cortex visuel puis, via des boucles cortico-corticales, vers des régions plus antérieures. A chaque étape, et de manière hiérarchique, une forme de traitement de plus en plus élaborée est appliquée. Cependant, la neuro-anatomie indique une réalité très différente. Au niveau des corps genouillés, les fibres montantes (de la rétine) ne représentent que 20% des afférences et, qui plus est, plus de la moitié des connections ne se font pas de « bas en haut » comme on pourrait s'y attendre dans des voies perceptives mais de « haut en bas », le reste étant constitué de liaisons horizontales. Cet ensemble suggère donc plus un fonctionnement global qu'un traitement linéaire étape par étape. « *Considérer les voies visuelles comme constituant un dispositif de traitement séquentiel s'avère complètement arbitraire; on pourrait tout aussi facilement voir la séquence se dérouler dans le sens opposé* » (Varela, Thompson & Rosch, 1993, p. 141). La seconde contradiction se rapporte à l'article princeps de Nashner & McCollum (1985). La proposition de ces derniers postule (et tend à montrer) l'existence de deux stratégies posturales (chevilles et hanches) distinctes en fonction de la perturbation appliquée, ce qui résolvait en partie le problème de la réduction du nombre de degrés de liberté posé par Bernstein. Depuis les travaux de ces auteurs, dans le cas du pendule inversé autour de la cheville pour de faibles perturbations, il est couramment admis, comme le relèvent Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999), qu'aucune rotation de hanche n'apparaît. Or, les observations de Nashner & McCollum (1985) eux-mêmes ou de Horak & Nashner (1986)

contredisent cette proposition, puisque des actions concomitantes des hanches et des chevilles apparaissent. Si la remise en cause de l'existence de deux stratégies distinctes ne remet pas en cause directement le modèle cognitiviste de la régulation posturale, elle le laisse face à un vide en la matière. De plus, il faudra bien donner du sens à cette co-activation, ce qui sera proposé, de fait, à travers d'autres ontologies.

De plus, la motricité en général et la posture en particulier, et ce de manière peut-être plus marquée que d'autres fonctions, tendent à remettre en question ce qui était pourtant une des propositions majeures des origines de ce courant : l'analogie entre l'Homme et l'ordinateur. Dans le domaine moteur, mais pas seulement (Webb, 2001, pour revue), cette analogie consiste en la fabrication de robots bipèdes, autonomes, capables de se mouvoir et d'interagir. En la matière, des progrès considérables ont été réalisés, en particulier par des entreprises japonaises et, en partie, européennes, avec les robots « Asimo » (Hirose & Ogawa, 2007), « Wabian 2LL » (Lim, Ogura & takanishi, 2008) ou « H7 » (Pfeifer & Inoue, 2007), dont le contrôle moteur est assuré à travers des modèles très inspirés du cognitivisme : *« Ceci [les aspects mécaniques] est accompagné par des systèmes de calcul et des logiciels qui fonctionnent en temps réel depuis les processus de bas niveau comme les boucles servo-motrices ou les processus senseurs jusqu'aux processus de haut niveau pour la planification du mouvement ou le contrôle comportemental »** (Pfeifer & Inoue, 2007, p. 5). Lire les descriptions ou voir à travers des documents vidéo les capacités extraordinaires de ces concentrés de technologies telles que marcher, courir, déplacer un plateau, monter des marches, servir à boire, il est vrai dans un univers fini, amènent néanmoins l'observateur, passée la période d'étonnement, à s'interroger sur au moins deux points. Tout d'abord, si le robot réalise effectivement beaucoup d'actes, la manière dont il le fait est très éloignée de celle dont un humain le ferait. Par exemple, pour venir chercher un plateau roulant, il réalise une trajectoire d'abord perpendiculaire au plateau, tourne de 90° dans sa direction puis ajuste par des pas latéraux sa position face à la poignée, là où tout être humain, dans un mouvement fluide, coupe la trajectoire et se retrouve directement en bonne position. Si en terme de programmation, le mouvement effectué par le robot (dans ce cas Asimo) se comprend bien, il n'a rien à voir avec du mouvement naturel. Et ce manque de fluidité lié à la gestion séquentielle du mouvement se retrouve en permanence. Par ailleurs, un autre constat encore plus simple peut être fait. Lorsque nous nous tenons debout, nous oscillons en permanence alors que les robots sont parfaitement et mécaniquement immobiles ! Autrement dit, ces robots ne présentent pas d'analogie avec l'Homme. Ce sont des machines qui se tiennent sur deux membres postérieurs mais dont la motricité est de toute autre nature que celle de l'Homme. Si, à partir d'un modèle très cognitiviste, le produit construit qui apparaît n'est pas une

motricité humaine, l'observateur est en droit de s'interroger quant à la pertinence de ce modèle pour faire l'analogie avec l'humain et peut être plus généralement avec le naturel. Certes, il peut s'agir d'une question d'achèvement du modèle ou de possibilités techniques et de calcul disponibles. De plus, il faut distinguer parmi ces robots, ceux d'usage et ceux dont la fonction est purement d'être un modèle (Webb, 2001). Il n'en reste pas moins que la question se pose et qu'une des réponses peut tenir dans l'inadaptation du modèle utilisé pour reproduire la motricité naturelle. Selon Marin & Oullier (2001), le problème tient au fait que les robots ne peuvent prétendre à la complexité qui caractérise les relations de l'humain à son environnement.

Enfin, une dernière question (qui elle-même en amène une autre), cette fois-ci d'ordre plus ontologique et épistémologique, et finalement très proche de la première limite évoquée, amène à se demander si, pour organiser du mouvement, une prescription sous forme de programmes est nécessaire. En effet, du mouvement naturel organisé apparaît dans la nature, dont l'Homme et sa motricité font partie, sans qu'une structure prescriptive ne l'organise. L'argument évoqué plus tôt est qu'il y a tellement d'éléments à faire fonctionner ensemble qu'il faut bien centraliser la connaissance de l'emplacement des différents éléments et prescrire leur déplacement en tenant compte de chacun. Pourtant, cette nécessité d'une planification est parfois contredite, même pour des systèmes constitués d'un grand nombre d'éléments. Les observations de Deneubourg (1977) montrent que la fabrication des termitières se fait sans qu'aucune des termites ne coordonne quoi que ce soit. De même, pris dans son ensemble, un banc de poissons est une organisation composée de nombreuses unités (parfois des milliards pour les migrations de sardines !), ayant des comportements très organisés (pas de collisions, ouverture / fermeture du banc en cas d'attaque de prédateurs, etc.) sans qu'un « poisson chef » ne « manage » le tout. Ces principes ne concernent pas que les poissons ou les insectes puisque le même type d'analyse permet de comprendre par exemple la formation en vagues des fronts de migration de mammifères, en l'occurrence des gnous (sur parfois plusieurs centaines de mètres de largeur) dans la savane africaine (Gerard *et al.*, 1994). Dans ces exemples, un système de quelques règles appliquées à chaque élément du système permet d'obtenir un comportement cohérent au niveau macroscopique. Face à un grand nombre de composants qui doivent agir simultanément, programmer le mouvement d'ensemble n'est pas la seule solution et ce n'est sans doute pas le moyen le plus économique. De plus, si le modèle cognitiviste offre une compréhension de la manière dont est produit et régulé le mouvement avec des processus parfois économiques en information, comme dans la régulation posturale, il n'explique pas comment sont choisis, parmi toutes les possibilités, les modes de réduction des degrés de liberté qui rendent le système contrôlable. Autrement dit, le cognitivisme n'est pas la seule alternative d'explication du

contrôle moteur et ne répond que très partiellement à certaines questions fondamentales. Ce qui ne signifie pas que ce modèle est sans intérêt. Bien au contraire, il offre une réelle intelligibilité, s'appuie sur un grand nombre de faits et de développements théoriques, et son utilité sociale existe à travers son application dans différents domaines qui vont, si l'on se restreint à la motricité, de la ré-éducation ou la suppléance à l'amélioration de la performance sportive de haut niveau. Toutefois, les limites évoquées amènent à prendre en considération que l'hypothèse fondatrice est discutable et que d'autres perspectives méritent d'être envisagées.

3. Les systèmes complexes

Si le courant cognitiviste a largement dominé la seconde moitié du 20^{ème} siècle et domine encore le champ des sciences cognitives, cela ne signifie aucunement qu'il fut et qu'il est exclusif. D'autres propositions théoriques, ne s'appuyant pas sur la métaphore de l'ordinateur type von Neuman, n'incluant pas ou, plus précisément ne donnant pas le même statut à la représentation, ont aussi fait leur chemin à côté du courant principal. Tout d'abord, le behaviorisme dominant de l'entre deux guerres n'a pas disparu du jour au lendemain et a cherché, d'une certaine manière, à s'adapter à travers, par exemple, le behaviorisme « radical »²¹ proposé par Skinner (1979) dans la deuxième partie de sa carrière. De plus, les tenants de la Gestalt ne se sont pas évaporés non plus et ils auront eu d'ailleurs un rôle important dans les propositions alternatives au cognitivisme par leur participation aux conférences Macy (tel Kohler en 1947) et la naissance du lien ambigu entre la psychologie et la deuxième cybernétique (Dupuy, 1994). Par ailleurs, et si l'on se restreint au champ des questions posées par la psychologie dite générale (Reuchlin, 1997), d'autres approches, principalement aux frontières des sciences cognitives et de la philosophie (Merleau-Ponty, 1945) existaient. Celles-ci, qui étaient apparues avant l'orée du cognitivisme, ont continué, parallèlement à certains excès positivistes de ce dernier, à être considérées sans pour autant bénéficier d'une grande visibilité. Elles ont toutefois repris une place nouvelle à la fin du 20^{ème} siècle, comme démontré par la place de nouveau accordée à l'expérience vécue et par le regain d'intérêt dans les sciences cognitives pour les approches phénoménologiques (Depraz, 2006). L'importance d'une cognition incarnée, de la première personne, de la signification et du contexte se retrouvent aussi dans l'essor (relatif) de l'anthropologie cognitive (Gladwin, 1964 ou Lave, 1988, évoqués en France par Lestel, 1993) ou encore de l'approche du « cours d'action » (Theureau, 2004) proposée dans le champ de l'ergonomie. Cela se traduit aussi par la proposition de replacer la psychologie telle qu'elle est vécue, la « psychologie populaire » et la culture au centre du questionnement (Bruner, 1997). Cet ensemble, s'il peut sembler hétérogène, trouve sa cohérence dans le fait qu'il s'appuie

21 Non pas au sens « excessif » mais par opposition au behaviorisme méthodologique.

principalement (mais non uniquement et pas toujours explicitement) sur une tradition psychologique classique, elle-même issue, lorsqu'elle s'en est séparée, d'une culture philosophique. De plus, si comme cela fut évoqué précédemment, le cognitivisme est né de la cybernétique et de l'analogie entre une machine à traiter de l'information et le cerveau humain, mettant entre parenthèses ou en les repoussant les questions posées par la phénoménologie ou les sciences sociales (Dupuy, 1994), une des propositions alternatives les plus fécondes ces derniers temps trouve ses sources elle aussi dans cette même cybernétique. En effet, les conférences Macy ont permis, par la suite, de passer d'une vision linéaire du monde cognitif issu de la tradition cartésienne à une vision dans laquelle le rétro-contrôle trouvait sa place grâce aux échanges entre chercheurs issus de différents champs scientifiques, en particulier des physiciens mathématiciens et précurseurs de l'informatique. Mais c'est ce même type d'échanges qui, à la même période, permettra l'émergence de l'idée de système complexe dans les sciences cognitives (Varela, Thompson & Rosch, 1993). D'ailleurs, les deux éléments de l'alternative (phénoménologiques et complexes) qui pourraient sembler a priori incompatibles, ne le sont pas nécessairement, comme le montre fort bien le programme commencé par Varela dont les bases sont largement développées dans « l'inscription corporelle de l'esprit » (Varela, Thompson & Rosch, 1993).

Le point nodal de leur proposition, à travers l'enaction, concerne le rejet de la réduction de l'activité cognitive à la computation de symboles représentant un monde pré-existant au profit d'une conception dans laquelle le sujet et l'environnement sont asymétriquement couplés dans un système autopoïétique (Varela, 1989), c'est à dire qui se produit et se maintient lui-même²². Après avoir remis en cause les fondements mêmes de l'hypothèse cognitiviste, ces auteurs proposent de partir de celle des capacités d'auto-organisation et de propriétés du système cognitif, et montrent qu'elles ne sont pas incompatibles avec l'organisation neuro-anatomique du cerveau par exemple, pour en conclure, dans un premier temps, que l'existence de symboles discrets, formant un niveau (celui des représentations) distinct, n'est en rien une nécessité pour les fonctions cognitives. Le sens est alors fonction de l'état global du système. Puis, dans un deuxième temps, ils montrent les problèmes que posent l'hypothèse de la représentation elle-même d'un monde non fini ainsi que leurs doutes quant à l'existence pour l'esprit humain d'un monde pré-existant : dans nos tâches quotidiennes, face à une infinité de possibles, le signe de l'intelligence n'est pas de résoudre une question mais de la poser, de la « faire-émerger ». Ce qui émerge le fait alors sur un arrière plan qui est à la fois nécessairement contextualisé et qui s'appuie sur notre sens commun, fruit d'une histoire physique et sociale. Par conséquent, selon ces auteurs, l'existence de représentations d'un monde pré-existant n'est donc pas le support de l'activité cognitive. Ils proposent comme alternative l'approche enactive dans laquelle

²² Par opposition à un système allopoïétique qui, lui, se construit à partir d'éléments qui viennent de son extérieur.

celui qui sait et ce qui est su se co-définissent. Le cadre théorique proposé par Francisco Varela et ses développements accordent, de fait, une grande importance à l'expérience vécue et redonnent une place non négligeable à la phénoménologie (Varela, 1999). Mais il accorde aussi, en particulier dans les débuts de sa démonstration, une place centrale aux théories de l'auto-organisation et de l'émergence qui seront aussi la base de propositions alternatives au cognitivisme dans le champ des activités sensori-motrices.

3.1. Une autre vision du monde

La pensée classique cartésienne, proposait, pour expliquer un phénomène, de remonter la chaîne des causalités puisqu'un premier événement était supposé en causer un second et lui-même un troisième et ainsi de suite. La première cybernétique, formalisée juste après la seconde guerre mondiale a, quant à elle, remis en cause l'idée de linéarité causale en introduisant celle de rétroaction selon laquelle la cause agit sur la conséquence qui elle-même agit sur la cause. Un tel système peut alors être amplificateur si causes et conséquences augmentent proportionnellement, mais il peut aussi, à partir du moment où il a une valeur de référence, être auto-régulé. Ceci a souvent amené à considérer la cybernétique comme une science de la commande des systèmes stabilisés. Comme évoqué plus haut, ce modèle, associé à la théorie de l'information proposée en 1949 par Shannon (Weaver & Shanon, 1975), est la base de la conception cognitiviste du contrôle moteur et plus généralement du fonctionnement cognitif. Dans ce cadre, comprendre un à un chacun des éléments qui composent le système et les relations qu'ils entretiennent doit permettre de comprendre l'ensemble du fonctionnement. Dit autrement, l'opération de réduction proposée par Descartes est toujours de mise. Mais à la même période, une seconde cybernétique associée au nom de Wiener, quand la première l'est à ceux de McCulloch (et ses neurones formels) ou de Von Neuman, prenait naissance²³. Cette seconde cybernétique remet en cause l'idée de réduction et montre que comprendre chacun des éléments indépendamment et éventuellement les liens qui les unissent dans un système cybernétique ne permet pas nécessairement de décrire le système. La proposition théorique alternative est alors celle des systèmes complexes. Fondamentalement, l'étymologie latine du mot « complexe » (cum plexus) renvoie à l'idée de lien (tissé ensemble), de rattachement, alors que celle du mot latin « compliqué » (cum pliare) renvoie à celle d'accumulation (Cotsaftis, 2008). Ce qui caractérise un système complexe, contrairement à un système compliqué, n'est pas nécessairement un grand nombre d'éléments (bien que ce soit souvent le cas), mais la nature du lien qui relie les éléments entre eux. Chaque élément agit sur les autres et réciproquement.

23 On peut noter, par ailleurs, que Turing qui fut à la fois promoteur des ordinateurs programmables et qui a montré comment des patrons peuvent émerger dans la nature sans programmation est revendiqué par les deux camps (Feynman, 1995).

Le comportement global ne peut donc pas s'expliquer par la somme des éléments qui le composent. De plus, les changements, au niveau macroscopique, qui font passer brusquement les systèmes complexes d'un état à un autre, le plus souvent de manière non prédictible, rendent les outils d'analyse linéaire classiques non adaptés à leur compréhension. En effet, la méthode analytique, qui consiste à étudier chacun des composants un à un, ne permet (par définition) pas de comprendre comment de nouveaux états qui ne peuvent être réduits à la somme des éléments qui les composent, émergent (Gell-Mann, 1995). En fait, si une définition de ce qu'est un système complexe ne fait pas nécessairement l'unanimité (Prigogine, 1992), le point le plus commun entre celles proposées est de considérer un système comme complexe comme un système auto-organisé. Dit autrement, le système s'organise lui-même, sans qu'un élément extérieur ou interne au système ne prescrive cette organisation et les propriétés qui en émergent. Ces différentes caractéristiques impliquent donc qu'un système complexe ne peut s'étudier que globalement, d'un point de vue holistique (Zwirn, 2006). Les illustrations données sont nombreuses dans les domaines de la physique ou de la biologie. Par exemple, pour reprendre une référence déjà évoquée, Deneubourg (1977) a montré comment, à partir de quelques règles simples, une colonie de termites arrive à organiser et construire une termitière, sans plan préalable, ou chef organisant le travail. Dans ce cas, l'étude même approfondie d'une termite ne permet en aucun cas d'expliquer le comportement global de la colonie. De même, le banc de poissons, capable de s'ouvrir à l'arrivée d'un prédateur puis de se refermer sans collisions, ne le fait pas sous la direction d'un commandement quelconque ou d'un programme coordonné qu'appliquerait chacun des individus. A partir d'un nombre limité de quelques règles simples qui s'appliquent à chaque individu (direction déterminée par la direction antérieure et par la position des individus les plus proches et la règle de non collision), un comportement global du banc émerge (Ferber, 1995). A l'arrivée du prédateur, ceux qui y sont directement confrontés adaptent leur comportement, modifiant ainsi la dynamique globale du banc, ce dernier se reconstituant lorsque la perturbation disparaît. La capacité des fourmis à utiliser le chemin le plus court pour se rendre d'une source de nourriture à la fourmilière en est aussi un exemple (Goss *et al.*, 1990). Comme les fourmis qui utilisent le chemin le plus court le parcourent plus que les autres, elles déposent plus de phéromones (du fait du plus grand nombre de passages) ce qui attire les autres fourmis sur ce trajet. Une vision globale ou un plan d'ensemble détenu par un « système organisateur » n'est donc pas nécessaire pour que les fourmis finissent par emprunter collectivement le chemin le plus court. La méthode analytique qui consiste à comprendre chaque élément pour comprendre l'ensemble ne peut donc, dans ces exemples s'appliquer. Tout comme l'étude d'une seule molécule d'eau ne permettra pas de comprendre les états (solides, liquides et gazeux) de l'eau qui apparaîtront en fonction de contraintes physiques telles que la température ou

la pression. Le niveau auquel se situe l'analyse est donc une donnée fondamentale dans l'approche complexe des processus qu'ils soient physiques, biologiques ou cognitifs. Par ailleurs, en plus de l'holisme, de l'émergence et de l'auto-organisation, les systèmes complexes se caractérisent aussi par l'imprévisibilité et la sensibilité aux conditions initiales, dit autrement par un comportement chaotique. Du point de vue mathématique, un comportement chaotique n'est pas stochastique, c'est-à-dire aléatoire, comme pourrait le laisser entendre la définition du dictionnaire Larousse (« état de confusion générale ») mais au contraire déterminé. Néanmoins, de minimes modifications des conditions initiales peuvent modifier radicalement, au cours du temps, le comportement du système étudié. Il n'existe donc pas de modèle qui permette de prédire directement ce que sera à un temps t ce comportement (Lemoigne, 1999). Par conséquent, les seuls moyens à disposition sont soit d'observer le système fonctionner au cours du temps, soit de le modéliser grâce aux ordinateurs (Zwirn, 2006).

Pour illustrer cette idée de dépendance aux conditions initiales de manière très simple, Haken (2000) prend l'exemple d'une bille que l'on place sur une lame de rasoir qui peut donc tomber de part ou d'autre lorsqu'elle est relâchée. Alors que le mouvement de la bille est en théorie mécaniquement prédictible au regard de la physique newtonienne, il n'est pas possible de prédire à coup sûr de quel côté elle tombera car d'infimes modifications, non mesurables au moment du lâcher, détermineront deux trajectoires radicalement différentes. Les exemples d'illustration sont en fait nombreux, les plus classiques étant l'attracteur de Lorenz (1963), pour ses qualités graphiques ou l'application logistique pour son formalisme très simple. Cette dernière s'exprime par une suite $x_{n+1}=kx_n(1-x_n)$ dans laquelle x est un nombre compris entre 0 et 1 et k une constante. Pour des valeurs de k comprises entre 0 et 3, la suite se fige, après un certain nombre d'itérations sur une valeur qui dépend de k et sa représentation graphique se résume donc à ce stade à une droite horizontale. Pour des valeurs de k comprises entre 3 et 3.449, les valeurs prises par la suite alternent entre deux nombres qui dépendent de k . Pour $k=3.45$, la valeur x suivra un cycle de 4 nombres. Puis, si on augmente k , le cycle passera à 8, 16, etc. nombres et sera ainsi dédoublé un nombre infini de fois, faisant entrer ainsi la suite dans un régime chaotique pour $k = 3.58$. Là encore, une variation minime des conditions initiales (valeur de k) amènera des comportements du système dans le temps très différents. De fait, les questions posées sont alors différentes de celles posées classiquement. Il s'agit moins de déterminer précisément de quelle manière le système se comportera à un temps t mais plutôt de déterminer s'il existe des comportements stationnaires (et donc à quelles conditions ce dernier apparaît) et si le système va tendre ou non à converger vers eux. Les applications de ces propositions ne se sont pas, loin s'en faut, cantonnées au domaine de la

physique (Haken, 2000) ou des mathématiques. En effet, avec des niveaux d'acceptation différents, un grand nombre de disciplines scientifiques telles que la biologie et en particulier la génétique (Maynard Smith, 2001), l'étude de l'évolution (voir la partie que Atlan, 1979 y consacre) ou encore l'éthologie (Camazine *et al.*, 2001), la géographie (Langlois, 2010) et la météorologie - Lorenz, dont l'attracteur évoqué ci-dessus est si célèbre, était un météorologue et il est considéré comme un des pères fondateurs de la météorologie moderne - l'économie ou la production industrielle (Zwirn, 2006), les sciences cognitives (Portugali & Haken, 1992; Varela, Thompson & Rosch, 1993), les sciences sociales et l'épistémologie qui s'y rapporte (Morin, 1982) s'en sont emparées pour proposer une autre explication du monde.

Ce fut aussi le cas, là aussi avec des acceptations différentes, dans des domaines plus proches ou faisant partie de la psychologie. Le darwinisme neuronal de Edelman (Changeux, 1997; Edelman, 1993; Hadders-Algra, 2001b), l'approche transactionnelle du développement (Goldfield, 1995), le développement cognitif et moteur (Thelen & Smith, 2001) ou la cognition envisagée comme processus continu dans un paysage cognitif (Spivey, 2007), les comportements sociaux comme le placement des uns relativement aux autres dans un match de basket-ball (Marsh, Richardson, Baron & Schmidt, 2006) ou de tennis (Palut & Zanone, 2005) ou encore le couplage d'activités perceptivo-motrices (évoqué plus loin) en sont de multiples exemples. Quel que soit le domaine, les ruptures ontologique et épistémologique entre ce monde « complexe » et un monde cartésien, analytique, qu'il soit linéaire ou qu'il intègre la rétroaction causale, sont donc claires et les approches fondamentalement différentes voire opposées. Par conséquent, les concepts et méthodes issus de la tradition scientifique classique deviennent en partie inopérants. Il est certes vrai que cette remise en cause de la tradition ne se fait pas sans heurts, ou incompréhension (voir le débat Newell / Schmidt, 2003 évoqué plus tard dans ce document). Mais force est de constater qu'à ce jour, et dans un grand nombre de disciplines, au moins deux approches contradictoires coexistent, qui toutes deux tendent à expliquer le monde. Toutefois, considérer que les deux points de vue sont également représentés dans la littérature scientifique serait sans doute éloigné de la réalité. Les systèmes complexes restent encore parfois envisagés comme une possible alternative à un modèle dominant tant l'histoire philosophique et scientifique mais aussi la pensée « commune » (le sens commun de Bachelard, 1938) portent l'approche analytique et la nécessité de la réduction. Comme cela a été évoqué plus tôt, les sciences cognitives n'échappent pas à cette dichotomie et les domaines du contrôle moteur et de la régulation posturale non plus. En effet, comme dans l'approche cognitiviste, à la frontière de la psychologie, des neurosciences et en partie de la biomécanique, il est proposé par un nombre croissant d'auteurs et de publications (Abernethy & Sparrow, 1992) d'envisager la

motricité à travers le prisme des systèmes complexes.

3.2. Systèmes complexes et motricité

Comme développé plus tôt, une des limites de l'approche cognitiviste du contrôle moteur tient au problème de la commande (Paillard, 1986e; Schmidt, 1993). Comment un organisateur central peut-il exploiter la quantité quasi infinie d'informations nécessaires à la programmation (qu'elle soit pas à pas ou non) d'un mouvement complexe ? De plus, un certain nombre de faits facilement observables ne s'expliquent pas bien au regard de ces théories. Par exemple, le passage du pas au galop lorsqu'un cheval accélère son allure (et la difficulté à maintenir le trot) ou, chez l'Homme, le passage soudain de la marche à la course, qu'il peut intentionnellement retarder, sans pour autant le faire disparaître quand l'allure imposée augmente. A ces questions (et d'autres envisagées plus loin comme le rôle de la variabilité au cours de l'action), les approches « complexes » proposent des réponses par nature différentes et en rupture avec les modèles classiques, mais fort convaincantes. Ce qui ne signifie pas que les travaux de référence de Schmidt (1993) sur le contrôle moteur ou de Nashner & McCollum (1985) sur la posture, par exemple, furent inutiles. En effet, c'est en partant de leurs limites (voire leurs contradictions, selon certains) que, dans certaines des publications de référence, les auteurs forment la réflexion (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999; Stoffregen & Riccio, 1988) qui amènera à des propositions alternatives. De plus, un chercheur comme Scott Kelso, à qui l'on doit des travaux paradigmatiques dans l'utilisation de la pensée complexe pour l'étude de la coordination motrice, a publié des travaux purement cognitivistes (Kelso & Norman, 1978) avant de s'intéresser à d'autres alternatives théoriques. Par ailleurs, il faut noter, en plus des apports des sciences de la complexité, l'importance dans l'émergence de ces études de la (re)lecture des travaux de Bernstein qui, dès les années quarante, mettait l'accent sur la question de la réduction du nombre de degrés de liberté à coordonner dans l'exécution d'un mouvement.

L'intégration des idées de la complexité dans l'étude de la motricité²⁴ est apparue au cours des années quatre-vingt (un tout petit peu plus tôt pour certains, comme Kelso, Southard & Goodman, 1979) et deux approches, contemporaines l'une de l'autre, se sont développées : la physique naturelle et la synergétique. Ces deux courants, loin d'être contradictoires, (on retrouve d'ailleurs parfois un même auteur dans les deux), empruntent largement l'un à l'autre et la distinction n'est, finalement, pas si simple à réaliser. Dans le premier, l'utilisation des idées issues des travaux de Gibson (1950) sur la nature du lien entre perception et action et celles de Bernstein associées aux

24 Dans le chapitre 2.2. un article de Rosenbaum (2005) était évoqué dans lequel cet auteur considérait que la motricité n'avait pas la place qu'elle méritait dans la psychologie cognitive (« la cendrillon de la psychologie »). Ce point de vue ne paraît pas s'appliquer aux approches complexes, les travaux sur les mouvements semblant, relativement aux autres domaines de la cognition, bien représentés.

approches complexes ont donné lieu à des propositions qui étaient, dans un premier temps, assez « métaphoriques » (Temprado & Montagne, 2001, p. 86), mais qui ont débouché sur des résultats fort éclairants dans le domaine de la coordination (intra ou inter-personnelle). Le second courant s'appuie au contraire sur un modèle préalablement développé, la synergétique, mathématiquement formalisé, et à vocation universelle, puisque selon Haken (dans la première phrase de la préface de la première édition de son ouvrage « *Information and Self Organization* ») « pratiquement toutes les disciplines sont concernées »* p. 7). Il s'est agi alors de faire entrer la coordination motrice dans le champ de cet « éventail », comme Haken le propose par exemple pour la géographie (Haken, 1985). Par la suite, des développements plus récents s'empareront des travaux fondateurs pour explorer les liens entre cognition et coordination (intention, apprentissage, etc.), (Lee, Blandin & Proteau, 1996; Nourrit *et al.*, 2003) et entre cerveau et coordination (Fuchs, Kelso & Haken, 1992).

Dans la perspective « physique naturelle », on considère que le système est composé d'une unité indissociable sujet / environnement et que les contraintes issues de l'environnement (mais aussi du sujet lui-même) vont faire émerger les coordinations motrices. Dans ce cadre, l'ensemble système nerveux / système musculo-squelettique est envisagé comme un système complexe ouvert (qui échange de l'énergie et interagit avec son environnement) dans lequel de l'ordre apparaît du fait de la transformation, ou plus précisément de la dissipation de l'énergie reçue (Kugler, Kelso & Turvey, 1980; Kugler, Kelso & Turvey, 1982). Autrement dit, ces propositions théoriques qui s'inspirent (en particulier dans l'article de 1982), de la thermodynamique et des travaux de Prigogine (1967), considèrent la coordination motrice comme une structure dissipative, comme un système temporaire qui va s'auto-organiser sous l'effet des contraintes (Kugler & Turvey, 1987; Kelso, 1995). Ces dernières peuvent être de différentes nature, énergétique, informationnelle, cognitive, biomécanique ou nerveuse (Chiel & Beer, 1997). Selon Newell (1986) et Newell & McDonald (1992), elles ont en fait trois sources : l'organisme lui-même, la tâche à réaliser et l'environnement dans lequel se déroule l'action. Les caractéristiques de l'organisme sont bien sûr anthropométriques mais aussi énergétiques, cognitives, attentionnelles et l'intention du sujet entre dans la tâche à réaliser. Ce propos est particulièrement important car il propose une alternative (tout au moins théorique) au recours à l'indispensable programme moteur des cognitivistes. De plus, comme le décrit Turvey (1990), ce point de vue s'inscrit dans la lignée des réflexions de Bernstein pour qui résoudre le problème de la coordination motrice revient à maîtriser les degrés de liberté et leur redondance : «... le contrôle du système moteur de notre corps est un problème complexe à multiples aspects, qui ne peut être résolu, même dans sa version simplifiée, par la technologie actuelle la plus sophistiquée. Sur la base de ces difficultés, je définirais ainsi la coordination

*motrice : coordonner, c'est dépasser le nombre excessif de degrés de liberté de nos « effecteurs »*²⁵, *c'est-à-dire transformer nos effecteurs en un système contrôlable.* »* (Bernstein, 1996, p. 41). Dans ses travaux, Bernstein (1967) fait davantage référence à l'organisation musculaire et articulaire, mais en principe, il peut s'envisager à tous les niveaux (Newell, 1996; Newell & Vaillancourt, 2001; Turvey & Carello, 1996). La coordination motrice consiste donc à exploiter les contraintes, n'imposant pas au système nerveux de « commander et contrôler » un système allonomique (par opposition à un système autonome) produisant l'ensemble du mouvement, comme proposé par les modèles classiques. Au contraire la fonction qui lui est attribuée est de créer les conditions nécessaires à la réalisation du mouvement. Elle est alors le fruit de l'interaction des forces et des influences mutuelles présentes pour l'action et dont l'équation de contrainte permet la mise en ordre du corps (Kugler & Turvey, 1988). Les termes coordination et contrôle, qui sont souvent confondus, reçoivent alors une définition plus stricte. En reprenant les suggestions de Kugler, Kelso & Turvey (1980), Newell (1985) les distingue en définissant la coordination comme « *la fonction qui contraint les variables potentiellement libres dans une unité comportementale [...], la base de cette fonction étant un ensemble de variables* »* et le contrôle comme « *le processus par lequel des valeurs sont assignées aux variables de cette fonction, c'est à dire, le paramétrage de la fonction* »* (p. 297). L'habileté motrice requiert alors que les valeurs optimales soient assignées aux variables contrôlées. Toutefois, comme le reconnaît Newell (1985), la nature de ces variables plus ou moins essentielles reste largement obscure. Ces nouvelles approches, théoriquement fortement étayées (voir la démonstration de Kugler, Kelso & Turvey, 1982, par exemple), ne s'appuyaient pas ou que très peu, dans un premier temps, sur des validations empiriques au sens habituellement entendu, Poperien. Mais rapidement, ces idées issues tout d'abord de la physique (Turvey, 1990), vont être développées et opérationnalisées dans le champ de la motricité sous forme de protocoles expérimentaux. Par exemple dans l'étude de l'apprentissage, Vereijken, Whiting & Beek (1992) pour des activités cycliques (un simulateur de ski) ou Temprado, Della-Grasta, Farell & Laurent, (1997) pour une habileté discrète (le service au volley-ball) ont montré qu'au cours de l'acquisition d'une habileté motrice, les sujets passaient par une première étape de gel des degrés de liberté qui en limite le nombre à maîtriser pour ensuite, au cours du temps, les relâcher et les intégrer dans de nouvelles structures de coordination stables. Cependant, alors que Temprado, Della-Grasta, Farell & Laurent (1997) en comparant plusieurs groupes proposent l'existence de coordinations intermédiaires pour un niveau situé entre experts et non experts, Nourrit *et al.* (2003), en s'appuyant sur une étude longitudinale sur simulateur de ski, montrent d'une part, une brusque bifurcation de la coordination du novice à celle de l'expert, et d'autre part, que les stades intermédiaires

25 « Movement organs » dans le texte.

correspondent en fait à une alternance de ces deux comportements. Newell (1986) quant à lui distingue, en relation avec les propositions de 1985 évoquées ci-dessus, (i) un stade de coordination, de mise en relation avec les éléments, (ii) un stade de contrôle, de paramétrage, et (iii) un stade d'habileté dans lequel le participant exploite les contraintes pour augmenter l'efficacité.

Envisager la question de la coordination inter-membres n'était pas une nouveauté. En effet, dès la fin des années 1930, von Holst (1969) en étudiant la coordination des oscillations des nageoires (qu'il isolait chirurgicalement les unes des autres, ou en observant les effets de la strychnine, ou par stimulation) du labrus (un poisson marin), a montré que lorsque ces dernières oscillaient ensemble, l'activité de l'une d'elles dépendait de l'activité des autres, et le faisaient à un rythme différent de celui qu'elles adoptaient isolément. Il a alors isolé trois tendances dans la formation de ces synergies. La première est celle dite de compétition (ou de maintien) dans laquelle chaque nageoire tend à conserver sa fréquence propre. Dans la deuxième, dite de surimposition, les rythmes d'oscillation s'additionnent (en terme d'amplitude). Dans la troisième, dite de coopération, les nageoires adoptent une fréquence commune qui n'est celle d'aucune prise isolément et alors une organisation commune, une coordination émerge. Turvey & Carello (1996) font d'ailleurs remarquer que ces travaux convergent avec ceux de Bernstein réalisés à la même époque. Par ailleurs, cette tendance à la coopération a été retrouvée par Kelso, Southard & Goodman (1979) dans une tâche d'atteinte bimanuelle pour laquelle l'indice de difficulté était différent pour chacune des deux mains. Dans les deux cas la synchronisation traduit une attraction vers une fréquence commune aux différents effecteurs. De façon à décrire ces coordinations, une ou quelques variables qui les résument au niveau macroscopique et qui en capturent l'ensemble, doivent être utilisés : les paramètres d'ordre (Beek, Peper & Stegeman, 1995). S'il n'existe pas a priori de méthode pour déterminer quelle sera cette variable (fonctionnelle), la lecture des travaux en la matière amène à constater que dans l'étude des coordinations, la phase relative entre deux oscillateurs est le plus souvent utilisée (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999; Burgess-Limerick, Abernethy & Neal, 1993; Kelso, 1984; Kelso, 1994; Oullier, Bardy, Stoffregen & Bootsma, 2002). Il s'agit en fait de la différence des angles polaires entre deux oscillateurs (tels que la hanche et la cheville dans l'étude de la posture). D'un point de vue graphique, pour un des oscillateurs à un temps t , on place sur l'axe des abscisses sa position normalisée (de -1 à 1 par exemple, dans ce cas le repère est orthonormé) et sur l'axe des ordonnées sa vitesse instantanée. La projection orthogonale de ces deux coordonnées permet de déterminer un point. L'angle formé par, d'une part le segment de droite déterminé par le point tracé et le point d'origine et, d'autre part la demi-droite formant un angle de 0° dans le cercle trigonométrique représente l'angle polaire de l'oscillateur considéré. Faire pour le

même temps t , la même opération pour le second oscillateur permet de faire la différence d'angles polaires entre les deux, c'est-à-dire déterminer la phase relative. Si les deux angles polaires à un moment donné sont égaux, alors, la phase relative entre les deux sera nulle (on dit alors qu'ils sont en phase) alors que si les deux demi-droites sont alignées alors la phase relative sera égale à 180° (on dit qu'ils sont en antiphasse), (figure 3).

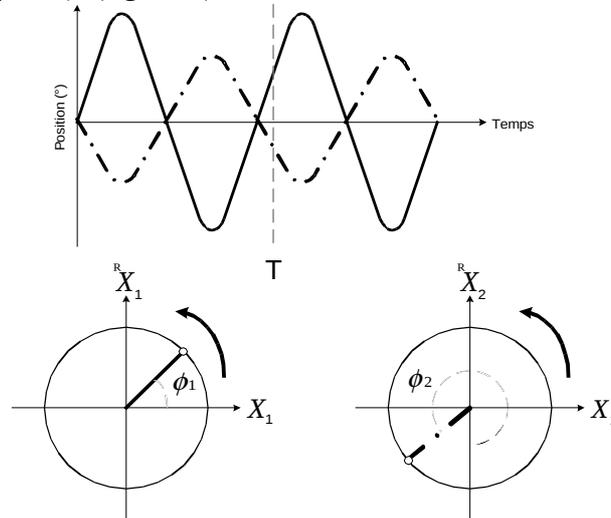


Figure 3 : Représentation de la coordination de deux oscillateurs en fonction du temps (sinusoïdes) et en fonction de leur angle polaire dans l'espace des phases à un temps t . L'espace des phases est tracé selon la position (en abscisses) et en fonction de la vitesse (en ordonnée). Les flèches indiquent le sens de rotation des oscillateurs au cycle limite. Dans cet exemple, la phase relative est de 180° et les oscillateurs sont donc en antiphasse

En fait, l'appellation générique « phase relative » peut représenter des réalités mathématiques un peu différentes puisque la manière de la calculer dépend de l'harmonie des mouvements des oscillateurs et l'absence de celle-ci peut amener à un biais de la valeur de la phase relative lorsqu'elle est calculée de manière continue comme présentée précédemment (Peters *et al.*, 2003). Dans le cas de mouvements non harmoniques des oscillateurs, la phase relative discrète, obtenue à partir des pics de revirement des mouvements sinusoïdaux des oscillateurs, est privilégiée (Zanone & Kelso, 1997). Selon Kelso (1994), les deux grandes qualités de cette variable dépendante sont qu'elle capture l'ordre spatio-temporel qui existe entre les éléments qui interagissent et qu'elle est plus robuste que celles qui décrivent le comportement de chacun des composants du système. En utilisant la phase relative comme variable dépendante et un dispositif de pendules que les participants activaient dans le plan sagittal appelé « *coupled wrist pendulum system* » (figure 4, et Kugler & Turvey, 1987, ch.6 pp. 129-157 pour détail du dispositif), Turvey, Rosenblum, Schmidt & Kugler (1986) ont montré que pour les fréquences les plus confortables pour les sujets, des patrons de coordination en phase (phase relative = 0°) et en anti-phase (phase relative = 180°) apparaissent spontanément et que le premier est plus stable que le second.

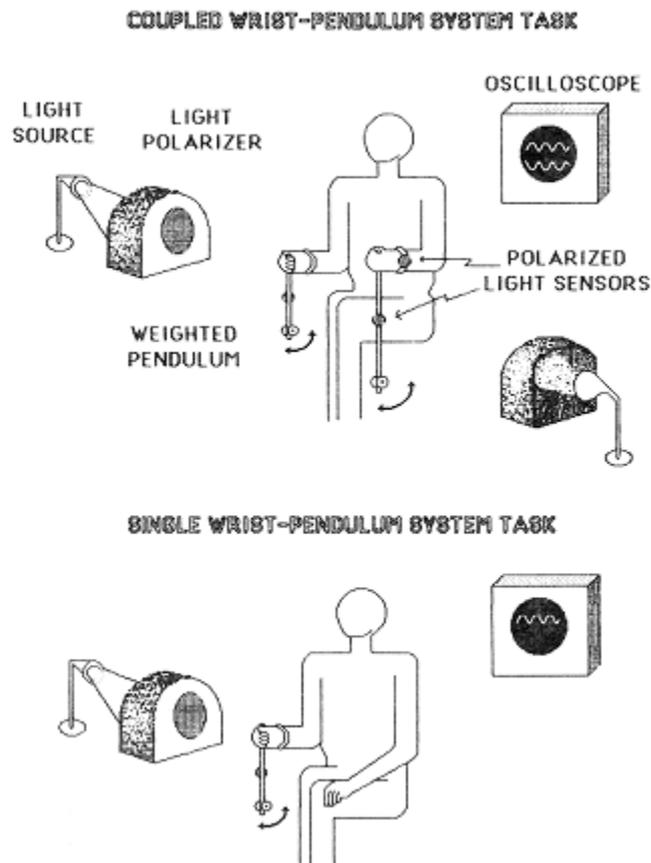


Figure 4 : Dispositif de double (haut) et simple (pendule), extrait de Turvey et al. (1986)

Ces études ou d'autres utilisant des dispositifs dérivés (Schmidt, Bienvenu, Fitzpatrick & Amazeen, 1998) ont aussi permis de montrer que le couplage ne relevait pas uniquement de contraintes biomécaniques. Richardson, Marsh & Schmidt, (2005), en s'appuyant sur une tâche utilisant un pendule, a révélé qu'une interaction visuelle entre deux co-acteurs renforce le couplage, et varie en fonction de l'attention du sujet (Richardson *et al.*, 2007). Cette remarque n'est pas triviale, loin s'en faut puisqu'elle souligne que le medium du couplage n'est pas exclusivement affaire de caractéristiques physiques. En argumentant que de nouvelles coordinations apparaissent sans que des contraintes purement énergétiques puissent l'expliquer, que l'intention du sujet (Schoner & Kelso, 1988) peut modifier la coordination, et en reprenant l'argument des coordinations interpersonnelles (Schmidt, Carello & Turvey, 1990), Kelso (1994) suggère que la nature de la dynamique des coordinations est avant tout informationnelle²⁶. Il ajoute de plus que « *manifestement il y a plusieurs mécanismes impliqués dans les transitions de phase dans les systèmes biologiques* »* (p. 402). Toutefois, tous les médias ne semblent pas être à l'origine de

²⁶ L'argument s'appuie ici sur les transitions qui est plutôt une idée fondamentale de la synergétique, présentée plus loin, mais pourrait s'appliquer à l'émergence de coordination.

couplage. En effet, les résultats de Richardson, Marsh & Schmidt (2005) indiquent que, si une interaction visuelle permet de faire émerger une coordination (non intentionnelle dans cet exemple), ce n'est pas le cas d'une interaction verbale.

Parallèlement à la « physique naturelle » et dans une forte proximité épistémologique avec cette dernière, s'est développée l'application des outils de la synergetique à l'étude de la coordination motrice. Cette approche, développée tout d'abord spécifiquement dans le domaine de la physique et de la production d'énergie par l'interaction d'éléments au début des années 1970 a été largement développée et a vu ses domaines d'application potentiels largement étendus par Hermann Haken dans les années 1980. Selon cet auteur (Haken, 1983; Haken, 2000), il s'agit d'une approche universelle qui propose des outils pour décrire formellement la dynamique (non linéaire) au cours du temps, sous l'effet de contraintes dans les systèmes complexes ouverts. Ce dernier aspect de sa proposition (systèmes ouverts) est de première importance puisque, par la même, il remet en cause (même si cela n'était sans doute pas son objectif principal) un des fondements du cognitivisme : la théorie de l'information de Weaver & Shannon (1975). En effet, dans cette dernière, l'information est définie en terme de réduction de l'incertitude, ce qui, selon Haken ne permet pas d'envisager la signification du message transmis et suppose de considérer le système émetteur / récepteur comme un système fermé dans lequel le nombre de messages potentiels est fini, ce qui ne correspond nullement à la réalité. Un certain nombre de principes fondamentaux peuvent alors être définis. Le premier est celui d'asservissement (« slaving principle »). La causalité d'un niveau à l'autre du système n'est pas linéaire mais circulaire puisque les éléments composants le système vont contraindre sa dynamique globale qui, en retour, va contraindre les éléments. L'autre grand principe est la non linéarité, puisque les transitions, c'est-à-dire les changements d'état du système, vont se faire brusquement sous l'effet des contraintes. Celles-ci appelées « paramètres de contrôle » peuvent être de différentes natures et non spécifiques au système. Dans le domaine moteur par exemple si par un battement rythmique (ou simplement par instruction) on demande à un marcheur d'accélérer, on observera soudainement, à une fréquence critique donnée, un changement d'état de la marche à la course, cette dernière n'étant pas de la marche en plus rapide. En terme de coordination, c'est autre chose. De plus, si l'on demande ensuite au désormais coureur de ralentir, alors, le passage à nouveau à l'état de marche (la transition inverse) ne se fera pas à la même fréquence que pour celle observée lors de l'augmentation du rythme, mais à une fréquence plus basse; c'est le phénomène d'hystérèse, qui, selon Kelso (1994), est « *une forme primitive de mémoire* »* (p. 399) et qui rend compte de la sensibilité du système à son histoire. De manière synthétique, on considère qu'un système est dynamique à travers l'existence d'au moins trois signatures : (i) l'existence de plusieurs

états stables (multistabilité) vers lesquels le système converge en fonction des contraintes, appelés aussi attracteurs, (ii) l'existence de transitions et (iii) l'hystérèse. A ces trois signatures, deux autres sont ajoutées (Haken, Kelso & Bunz, 1985), les fluctuations critiques et le temps de relaxation. La première rend compte d'une augmentation de la variabilité de valeurs du paramètre d'ordre à l'approche de la valeur critique du paramètre de contrôle. La seconde, le temps de relaxation, concerne le temps nécessaire pour que le système revienne à un état d'équilibre stable lorsqu'il en a été éloigné par une perturbation. L'existence de ces cinq signatures d'un système dynamique a été mise en évidence dans la coordination motrice (Bardy, 2006; Kelso & Schoner, 1988). L'objectif de la synergétique est alors (i) de formaliser et modéliser la dynamique du paramètre d'ordre étudié à travers des équations différentielles qui rendent compte de la multistabilité et des transitions et (ii) de confronter ces modèles à la réalité expérimentale. Le modèle proposé en 1985 par Haken, Kelso & Bunz (le modèle HKB) pour l'étude des coordinations motrices est celui de la « fonction potentiel ». L'illustration qu'ils en proposent est (dans leur exemple) un paysage en deux dimensions orienté par la gravité, composé d'une ligne formant trois puits qui représentent les états attracteurs, celui du milieu étant le plus profond (avec la plus forte pente, donc le plus attracteur), et par conséquent deux bosses (figure 5).

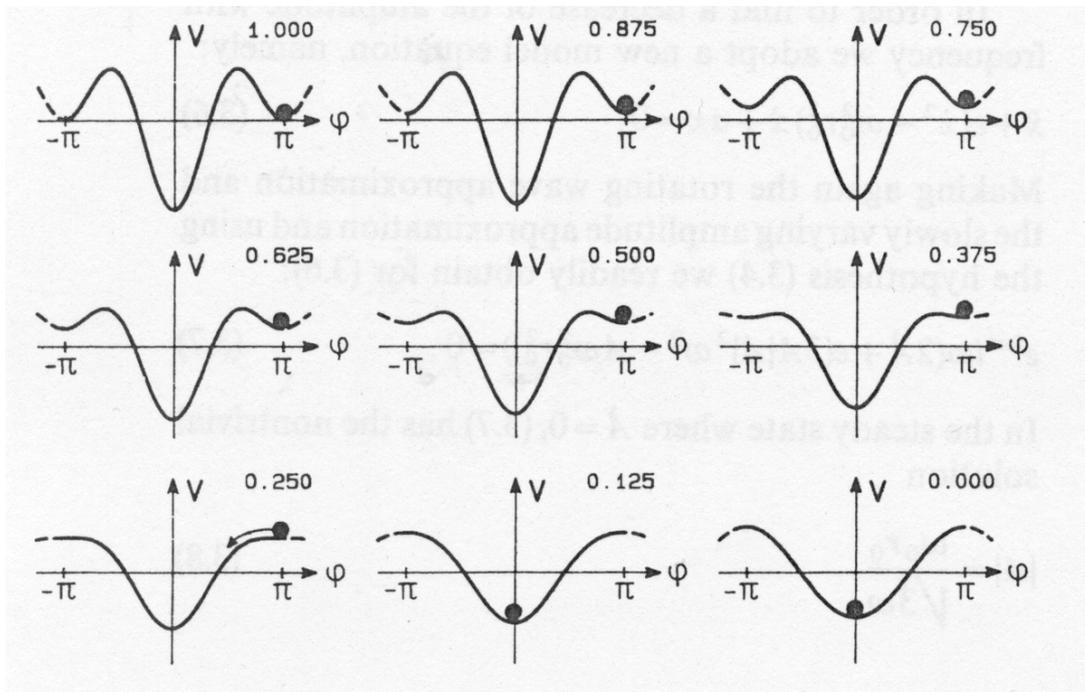


Figure 5 : Evolution de la fonction potentiel selon les valeurs du paramètre de contrôle (b/a). Les nombres réfèrent au ratio b/a et la bille noire, l'état du système situé initialement dans un mode en antiphase pour $b/a = 1$ et en phase pour $b/a = 0$. Lorsque b/a tend de 1 vers 0, le système bifurque pour $b/a = 0,25$ (d'après Haken et al, 1985).

Dans un des puits extérieurs se trouve une balle, qui représente le paramètre d'ordre qui pourrait y rester indéfiniment puisque les variations stochastiques de position de la balle au fond du puits (le bruit issu de l'interaction des éléments du système) ne sont pas assez importantes dans ce paysage pour qu'elle franchisse la bosse. Lorsque, sous l'effet de contraintes, le paysage se modifie et que les creux deviennent moins profonds, arrivera un moment où la balle franchira soudainement la bosse et tombera vers le puits du milieu (voir figure 5). La mise en oeuvre empirique appliquée à la motricité de ce modèle a été réalisée à travers une expérience devenue paradigmatique de coordination bimanuelle (Haken, Kelso & Bunz, 1985). Les participants devaient faire osciller rythmiquement leurs index soit en anti-phase (lorsque l'un est en flexion l'autre est en extension) soit en phase (Kelso, 1984). Le paramètre de contrôle utilisé était la vitesse d'oscillation (donnée par pas de 0,25 Hz) et celui d'ordre la phase relative. Les résultats mettent en évidence que le patron en phase est plus stable que le patron en antiphase, et que, dans le cas de ce dernier, l'augmentation du paramètre de contrôle induit l'apparition de fluctuations puis une bascule dans le mode en phase. En revanche, les sujets ne passaient pas spontanément du mode en phase à l'antiphase vérifiant ainsi le modèle²⁷. Néanmoins, si cette modélisation fonctionne dans le cas d'oscillateurs symétriques, c'est-à-dire ayant la même fréquence propre, elle ne tient pas compte de l'éventualité d'un système asymétrique comme dans le cas de membres non homologues évoqué brièvement plus loin (Jeka & Kelso, 1995; Kelso, 1994; Kelso & Zanone, 2002). Or, par exemple, la fréquence d'oscillation maximale est d'environ 2,5 Hz lorsque celle d'un bras est de 3,6 Hz et de 1,8 Hz lorsqu'ils fonctionnent ensemble (Kelso & Jeka, 1992). Le modèle a donc été amendé et un terme ($\Delta\omega$ qui représente la différence de variation de fréquence des oscillateurs) a été ajouté au modèle mathématique²⁸.

Ces travaux pionniers ont alors donné lieu à de nombreux développements comme l'étude de la coordination entre les quatre membres (Jeka, Kelso & Kiemel, 1993) ou entre un stimulus auditif et une activité rythmique de flexion / extension de l'index (Kelso, Delcolle & Schoner, 1990) ou encore, entre deux personnes (Schmidt, Carello & Turvey, 1990). Dans tous ces travaux, les caractéristiques attendues (fluctuations, bistabilité, mode en phase plus stable, transition) apparaissent suggérant à la fois la pertinence et la fécondité des propositions de la synergétique dans le domaine de la compréhension du fonctionnement de la motricité. Cependant, ces seules contributions réduiraient la coordination à un nombre finalement limité de patrons déterminés par

27 Du point de vue mathématique, la phase relative est donnée par l'équation : $V(\Phi) = -a\cos(\Phi) - b\cos(2\Phi)$

avec Φ : la phase relative et le rapport b/a : la valeur d'un paramètre de contrôle sur la dynamique de coordination.

Pour $b/a = 1$, le patron est l'anti-phase et pour $b/a = 0$, le patron est la phase. Lorsque b/a tend de 1 vers 0, le système bifurque vers la phase pour $b/a = 0,25$ (Haken, Kelso & Bunz, 1985).

28 L'équation devient alors : $V(\Phi) = -\Delta\omega\Phi - a\cos(\Phi) - b\cos(2\Phi)$. Si $\Delta\omega$ est différente de 0, alors la fonction devient dissymétrique et si $\Delta\omega$ est très grande alors aucun état stable ne subsiste (Kelso & Jeka, 1992).

les caractéristiques biomécaniques (Kay, Kelso, Saltzman & Schoner, 1987) et énergétiques (à travers la dissipation d'énergie) du système sur lequel l'individu n'aurait guère de prise, ce qui ne correspond en rien à la réalité de nos mouvements tels que nous pouvons le constater quotidiennement. Nous sommes capables de créer volontairement une coordination (Lee, Blandin & Proteau, 1996) voire de la stabiliser dans le cadre d'un apprentissage (Zanone & Kelso, 1992b). En d'autres termes, nous sommes, fort heureusement, capables d'agir (dans certaines limites) sur la dynamique de coordination pour produire l'émergence d'un nouveau patron (Newell, 1996; Schoner, Zanone & Kelso, 1992). Il s'agit alors de créer un nouveau bassin d'attraction. Schoner & Kelso (1988) ont donc proposé de compléter le modèle HKB en intégrant l'influence de l'information environnementale (appelé paramètre ψ)²⁹. Selon ces auteurs, le comportement requis peut avoir différentes formes, provenir de la tâche elle-même (couplage avec un métronome par exemple) ou du sujet lui-même. « *D'un point de vue théorique, l'information environnementale est envisagée comme une contribution à la dynamique de la variable collective qui attirera le système vers le patron comportemental requis. [...] La mémoire peut être traitée de la même manière : son contenu peut être considéré comme une information spécifique au comportement appris [...qui est...] considéré comme une contribution à la dynamique du paramètre d'ordre qui attire le système vers le patron comportemental mémorisé* »* (Schoner & Kelso, 1988, pp. 73 et 74). Dans cette approche, l'importance de l'information dans la dynamique comportementale n'est pas niée. Mais elle n'est pas non plus considérée comme prescriptive. L'information va entrer dans l'équation de contraintes, va faire partie des éléments qui vont interagir pour faire émerger la coordination requise. Ces propositions théoriques vont elles aussi connaître des développements empiriques qui s'attacheront à explorer les effets de l'intention du sujet dans le maintien de nouveaux patrons et par conséquent de l'apprentissage mais aussi son coût attentionnel.

En demandant aux participants de basculer (à un signal lumineux) dans un mouvement de pronation / supination des avant bras rythmé ou non par un métronome, Carson, Byblow, Abernethy & Summers (1996) ont montré que la durée de transition de la phase (patron préférentiel) à l'antiphase était plus longue que l'inverse suggérant qu'il est plus difficile de déstabiliser le patron privilégié. Cependant, les auteurs font aussi remarquer que, d'une part, en présence de métronome, les temps de transition sont plus longs qu'en son absence et, d'autre part, que le temps de transition dépend de la fréquence imposée par le métronome (quand bien même celui-ci est retiré avant l'apparition du signal visuel). En fait, à haute fréquence, le passage de phase en antiphase se fait

29 Dans ce cas, la phase relative devient alors : $V\Phi = -a\cos\Phi - b\cos(2\Phi) - c\cos((\Phi - \psi)/2)$ où les deux premiers termes représentent la dynamique intrinsèque du système sous l'influence du paramètre de contrôle b/a (voir ci dessus), ψ la coordination requise et c l'influence de l'information environnementale.

plus rapidement en raison de la dynamique propre de la coordination. Ces résultats indiquent donc que si l'intention permet de changer la dynamique intrinsèque du système, celle-ci, en retour, contraint l'intention. Inversement, Lee, Blandin & Proteau (1996) montrent que sur instruction les participants peuvent empêcher l'apparition du patron en phase lors du même type de mouvement que celui utilisé par Carson, Byblow, Abernethy & Summers (1996), et concluent que le « *contrôle volontaire peut l'emporter sur la tendance dynamique inhérente au système moteur* »* (p. 100). Néanmoins, ils observent aussi que, si le patron en anti-phase n'apparaît pas lorsque la fréquence augmente, les fluctuations autour de 180° se développent.

En utilisant le même type de tâche, flexions-extensions des index (Zanone & Kelso, 1992b; Zanone & Kelso, 1997), des poignets (Amazeen, 2002), des coudes (Fontaine, Lee & Swinnen, 1997; Lee, Swinnen & Verschueren, 1995; Swinnen *et al.*, 1997; Wenderoth, Bock & Krohn, 2002), des jambes (Kelso & Zanone, 2002) ou encore des avant-bras (en prono-supination) (Kostrubiec & Zanone, 2002), de nombreuses études se sont attachées à décrire la dynamique de l'apprentissage. Il s'agit, le plus souvent d'apprendre des patrons de phase relative qui ne soient ni de l'antiphase ni de la phase, le plus souvent mais pas exclusivement, 90° de phase relative. Au fur et à mesure des répétitions, la coordination s'extrait des patrons préférentiels, devient plus précise et se stabilise (Amazeen, 2002). Selon Kelso & Zanone (2002), et en référence au modèle HKB, l'apprentissage implique le déplacement ou la création de nouveaux bassins d'attraction, distinct des attracteurs initiaux qui attire vers lui l'ensemble de la dynamique de coordination. En la matière, différents points de vue apparaissent. Selon Smethurst & Carson (2001), les attracteurs initiaux ne sont, en fait, pas déstabilisés, mais leur attraction peut être simplement réprimée et selon Swinnen *et al.* (1997), les perturbations ne seraient que temporaires avant de redevenir multistables. Cependant, l'analyse du diagramme des phases entre 0° et 180° ou entre 0° et 360° (balayage à faible intervalle) indique que, au cours de l'apprentissage et après stabilisation de la nouvelle coordination, le paysage de la dynamique est modifié (Kelso & Zanone, 2002). De plus, l'ajout d'une information extérieure au participant (auditive par exemple) réduit la variabilité spatiale et temporelle des coordinations (Byblow, Carson & Goodman, 1994) et s'exprime tant au niveau d'un composant que de la coordination globale (Fink, Foo & Jirsa, 2000). Néanmoins, cela ne signifie pas que la détermination de la coordination est exclusivement « extérieure » au système. En effet, en abordant la question de « l'effet d'ancrage » du point de vue plurimodalitaire (haptique et auditif), Kelso, Fink, DeLaplain & Carson (2001) indiquent que dans le mouvement intentionnel, le toucher et le son participent d'un tout cohérent, rejetant ainsi un simple effet d'entraînement du stimulus sonore. D'un point de vue théorique, ces différents éléments replacent donc l'information non pas à l'origine

ni au centre de l'activité motrice mais lui donnent une part tout à fait importante. Autrement dit, dans les approches dynamiques, si l'information ne prescrit pas le mouvement elle le contraint (dans une certaine mesure) pour fournir une activité volontaire.

Par ailleurs, tout comme le coût énergétique du maintien des coordinations (dans la marche par exemple, voir Diedrich & Warren, 1995), le coût cognitif a aussi été évalué à travers les processus attentionnels. Cette idée peut paraître surprenante tant ces derniers ont été associés aux approches cognitivistes et à l'évaluation des capacités et fonctionnalités du canal unique de traitement évoqué au chapitre 2. De ce point de vue, puisque l'attention est le reflet des caractéristiques fondamentales du système, la question est avant tout d'analyser (au sens cartésien du terme) son fonctionnement. Du point de vue dynamique, l'attention est considérée comme un des éléments interagissant et la question concerne surtout son influence sur l'émergence des coordinations. La méthode d'expérimentation a donc été la traditionnelle double tâche (Navon, 1984; Posner, 1978; Tsang, Velasquez & Vidulich, 1996) dans laquelle, dans ce cas, le participant doit réaliser une coordination motrice et une tâche de type temps de réaction. En manipulant les conditions, ce type de protocole permet de mesurer l'influence de l'attention sur le maintien de coordinations et inversement. Dans une double tâche de coordination des bras (avec des joysticks) et de réponse podale à un stimulus auditif, Temprado, Zanone, Monno & Laurent (1999) ont montré l'existence d'un conflit entre les deux tâches, en particulier lorsque la priorité était donnée à l'activité motrice puisque, plus la stabilité du patron (phase ou anti-phase) est élevée, plus le temps de réaction l'est aussi. En revanche lorsque la priorité est donnée au temps de réaction, la différence de stabilité en phase et anti-phase persiste. Cependant, le patron en phase est moins sensible à l'effet de la double tâche indiquant un plus faible coût attentionnel à son maintien. Par ailleurs, les transitions de coordinations (de l'antiphase à la phase) sont affectées par une situation de double tâche (Monno *et al.*, 2000). Lorsque la fréquence d'oscillation augmente, la variabilité de la phase relative augmente aussi, ainsi que les temps de réaction et lorsque la priorité est donnée à l'exécution motrice, les temps de réaction sont plus grands dans les essais pour lesquels des transitions apparaissent que pour les autres suggérant le coût attentionnel du maintien de l'anti-phase. Ces résultats sont confirmés par Temprado, Zanone, Monno & Laurent (2001). Selon ces auteurs, « *l'amplitude de la perturbation qui découle de l'interférence avec une activité centrale est déterminée par la force du couplage implémentée par le système nerveux à travers l'allocation de ressources. Plus le couplage est fort, plus faible est l'interférence centrale* »* (p. 1311). Selon ces propositions, l'allocation de ressources attentionnelles représente l'activité centrale nécessaire au maintien du couplage et les effets de l'attention (stabilisation ou déstabilisation) et d'interférence

(perturbation des patrons) dépendent (et représentent donc au niveau empirique) de la force de couplage entre les composants (Monno, Temprado, Zanone & Laurent, 2002). Enfin, pour clore ce rapide panorama, deux arguments peuvent être ajoutés qui concernent des aspects plus structurels. Tout d'abord, l'influence de l'information a aussi été explorée, à travers le couplage entre dynamique de la coordination motrice et dynamique cérébrale. En enregistrant l'activité cérébrale grâce à la MEG, Fuchs, Kelso & Haken (1992), Kelso *et al.* (1998) ont montré que la coordination bimanuelle et le fonctionnement cérébral partageaient une dynamique temporelle commune et que l'activité nerveuse en terme de patrons répond aux exigences de la tâche. Fuchs, Jirsa & Kelso (2000), ont donc proposé une modélisation de cette relation, dont les prédictions, selon les conclusions des auteurs, sont remarquablement bonnes au regard des données expérimentales. Ensuite, à un autre niveau, des travaux se sont développés vers l'étude de l'activité corticale en elle-même en tant que système complexe en utilisant des techniques dérivées de l'électroencéphalographie (Tognoli & Kelso (2009), dont la résolution temporelle semble plus satisfaisante.

En résumé, si l'on se limite au domaine de la coordination motrice, l'approche en termes de systèmes complexes amène à ce jour un cadre théorique et des propositions de modélisation, le tout étayé par un corpus de données cohérent. Certes, de nombreuses questions restent posées ou plutôt doivent encore être plus explorées, telles que celle du mouvement discret, ou les activités naturelles et / ou multisegmentaires mais on ne peut que constater que l'analyse dynamique propose, en explorant un monde dont la nature supposée est radicalement différente, des réponses aux limites intrinsèques des approches cognitivistes. Néanmoins, si l'on se restreint à ce qui est présenté ci-dessus, les réponses données quant à la place et au rapport que l'organisme entretient avec son environnement est peu développée.

Dans les approches classiques du traitement de l'information, l'individu est séparé de son environnement qui lui pré-existe, et il se le représente dans un système de traitement unique qui lui permettra aussi de prescrire le mouvement. En abordant le monde du point de vue de la complexité, considérer l'étape prescriptive perd tout son sens et par conséquent, celle de la construction d'un monde interne qui permettra de construire l'action tout autant. En d'autres termes, comprendre l'individu agissant comme un système complexe ne peut se satisfaire d'une compréhension de la perception en tant qu'outil de reconstruction interne et symbolique du monde. L'approche qualifiée d'écologique, dont l'inspirateur est James J. Gibson, propose une alternative ontologique radicalement différente quant à la question du rapport sujet / environnement. Ses propositions³⁰ et leur développement offrent alors un complément aux approches dynamiques de la coordination

30 Chronologiquement antérieures à ce qui a été présenté quant à la physique naturelle et à la synergétique.

motrice permettant de construire un champ conceptuel global pour l'étude de l'individu (humain mais pas seulement) agissant dans son environnement. La proximité épistémologique entre les approches dynamiques au sens large et celles de Gibson, formé par les gestaltistes³¹, est de fait. En effet, il considère d'emblée que l'étude de la perception ne peut se faire que dans le cadre de la compréhension d'un couplage perception / action et d'un couplage sujet / environnement dans lequel chacun spécifie l'autre. D'ailleurs, un certain nombre d'auteurs se retrouvent aussi bien dans les approches écologiques que dynamiques, et le développement des secondes doit sans doute beaucoup à la création par Turvey et ses collaborateurs d'un centre d'étude écologique de la perception et de l'action. De plus, s'ils n'ont jamais été totalement méconnus, les travaux de Gibson semblent, un peu à l'instar de ceux de Bernstein, être re-découverts à la fin des années soixante-dix (Turvey, 1977) dans ce qui semble être une démarche globale de certains chercheurs de remise en cause du cognitivisme et / ou d'ouverture vers des alternatives théoriques. Il faut noter toutefois que, au regard de certaines publications appelant à l'unification (Michaels, 1998) le lien entre approches écologiques et dynamiques ne semble pas s'être fait aussi simplement que le propos ci-dessus pourrait le laisser entendre³².

Bien qu'il ait publié des réflexions sur d'autres modalités sensorielles comme le toucher (Gibson, 1962), les travaux de Gibson portaient avant tout sur les déplacements visuellement contrôlés et l'orientation visuelle (Gibson, 1958). Son point de départ s'appuyait sur de simples questions : « *Comment l'animal réagit aux surfaces solides de son environnement sans provoquer de collisions [...] ? Qu'est ce qui indique à l'animal qu'il est en train de bouger ou non ? Quel type de stimulation visuelle indique l'approche d'un objet ? Comment fait l'animal pour entrer en contact sans collision ? Qu'est ce qui gouverne le déplacement orienté dans une direction ?* »* (p. 183). Dans cet article, Gibson propose alors cinq formules qui concernent (i) démarrer / arrêter / revenir (ii) orienter, naviguer (iii) s'approcher sans collision (iv) naviguer à travers des obstacles (v) poursuivre et voler. Son approche originale s'appuiera sur une conception de l'information radicalement différente de la traditionnelle reconstruction symbolique d'un monde pré-existant à partir de l'image rétinienne. En effet, il considère non pas le sujet d'une part et son environnement d'autre part, mais l'ensemble comme un système dans lequel perception et action sont couplées. L'individu interagit en permanence avec le monde et ces interactions vont elles mêmes influencer les systèmes perceptifs de l'individu (Gibson, 1966). La perception « émerge » donc des interactions

31 La contribution des gestaltistes à la deuxième cybernétique des conférences Macy n'est pas négligeable (Dupuy, 1994), et ils posèrent d'emblée la question du couplage sujet / monde, ainsi que celle de l'incarnation de la perception (Gapenne & Rovira, 1999).

32 Cette volonté transparait tout au long de l'ouvrage dont cet article est extrait (voir par exemple l'article de Bootsma, 1998) mais aussi chez Beek, Peper & Stegeman (1995) dans une approche plus théorisée.

du système sujet / environnement et lui permettra d'accéder à l'information utile pour guider son action³³. Un autre aspect original de la réflexion de Gibson est qu'il considère l'environnement physique à travers les surfaces possédant des formes, des orientations qui vont déterminer les caractéristiques des patrons d'énergie (lumineuse) qui vont être capturées par le sujet. D'un point de vue fonctionnel, la lumière n'est pas captée à travers ses caractéristiques corpusculaires et/ou ondulatoires mais structurée en lumière ambiante par les surfaces qui la réfléchissent (ou la réfractent selon les milieux). Ces patrons d'énergie capturés dépendront donc nécessairement de la place du sujet dans l'environnement à un moment donné (Gibson, 1979) et à chaque point d'observation correspondra un patron d'énergie spécifique et unique qui forme la configuration optique. Les changements dans cette dernière, provoqués par les déplacements du sujet ou de l'environnement, constituent alors le flux optique. Pour illustrer cette idée, Gibson (1950) propose la représentation sous forme de champ vectoriel du flux optique d'un pilote arrivant sur une piste d'atterrissage (pp. 121 et 125), le déplacement de l'avion (et donc du pilote) provoquant, dans ce cas, le flux (figure 6).



Figure 6 : Flux optique d'un pilote d'avion survolant une piste d'atterrissage représenté par un champ vectoriel (extrait de Gibson, 1950)

Le flux global est principalement structuré à partir de celui orienté vers l'individu (radial) et perpendiculaire à lui (lamellaire) (Stoffregen, 1985; Warren, 1998) auquel Bardy, Warren & Kay (1999) ont ajouté un flux intermédiaire de 30° à 45° entre les deux premiers. Néanmoins, le flux capté par la rétine dépend aussi des déplacements qui peuvent être en rotation, ajoutant ainsi une

33 L'usage de l'expression perception / action dans ce cadre est toutefois abusive et ambiguë. Comme le rappelle Bootsma (1998), l'information, à travers les propriétés du système sujet / environnement, est directement contenue dans le flux spécifique à la situation et la perception est le processus par lequel le sujet la détecte. Inversement, ce qui est mis en jeu n'est pas la simple conséquence mais celle de l'interaction entre l'information et l'action que souhaite réaliser le sujet. Perception / action et information / mouvement ne sont pas de même niveau et il serait plus rigoureux de parler du deuxième couple.

composante, du corps, du segment céphalique et des yeux eux-mêmes (Li & Warren, 2002). Sur la célèbre illustration de l'arrivée sur la piste d'atterrissage proposée par Gibson (1950), on peut tout simplement observer que les vecteurs les plus éloignés sont les plus courts (parallaxe du mouvement) ou que selon la direction du déplacement (vers ou perpendiculaire à la piste), les vecteurs n'ont pas la même orientation. Et ceci serait vrai quels que soient l'environnement et l'animal qui se déplace. Autrement dit, ces caractéristiques, ces transformations continues de la configuration sont toujours vraies, invariantes et d'autres ne peuvent exister. A condition que l'animal soit équipé pour les détecter, ces invariants vont l'informer quant à son environnement et son action dans celui-ci. Par exemple, la parallaxe du mouvement évoquée ci-dessus, est un invariant structurel qui informe sur l'emplacement relatif des « objets » visibles (Guerraz, Sakellari, Burchill & Bronstein, 2000; Li & Warren, 2000). D'autres invariants dits de contrôle informent le sujet quant à ses déplacements dans l'environnement, comme « l'exproprioception » (Lee & Aronson, 1974, Gibson, 1950 parlant lui même de « *visual kinesthesia* », p. 224) mais aussi quant aux déplacements de l'environnement relativement à lui-même (Shaw, Turvey & Mace, 1981). Ces invariants sont par exemple le foyer d'expansion (Warren, Kay & Yilmaz, 1996), point à partir duquel les éléments du flux divergent dans le cas d'un individu se déplaçant dans une direction et qui spécifie la direction du déplacement de l'individu, ou encore l'accélération optique verticale d'un mobile (Regan & Hamstra, 1993). Le plus connu de ces invariants de contrôle, tant pour sa formalisation mathématique que par les liens qu'il entretient avec des aspects neurophysiologiques (Wang & Frost, 1992) mais aussi pour les critiques qu'il a suscité, semble être « Tau » (Lee, 1974; Lee, 1976) relatif à la vitesse d'expansion des contours d'une surface de l'environnement et qui spécifie le temps de pré-contact entre un mobile et le sujet si ceux-ci sont sur une des trajectoires de collision (figure 7).

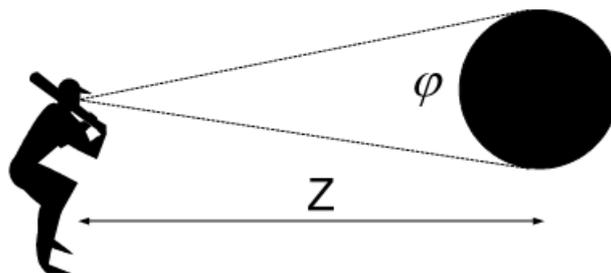


Figure 7 : Tau (τ) est l'inverse de la vitesse relative d'expansion des contours du mobile. $\tau = (\varphi / (d\varphi / dt)) = -Z / (dZ / dt) = TC1$. Il spécifie le temps de précontact de premier ordre (TC_1). Z : distance entre la balle et le batteur, φ : angle sous-tendu au point d'observation par les contours de la balle.

D'un point de vue empirique, il a été montré que cet invariant était utilisé par les gymnastes pour ouvrir le corps au bon moment et à la bonne vitesse pour se réceptionner après un salto arrière groupé (Bardy & Laurent, 1998) ou pour réguler la course d'élan à l'approche de la planche en saut en longueur (Warren & Yaffe, 1989; Warren, Young & Lee, 1986). Plus récemment, Lee (2009) a proposé une extension vers une théorie générale de Tau qui s'appliquerait à tous les domaines et donne les exemples du contrôle du regard, de l'expression musicale ou propose des pistes d'applications médicales. L'idée fondamentale concerne le contrôle de la réduction, de la fermeture de l'intervalle entre l'état actuel et l'état à atteindre (« *closure of action gap* »). Néanmoins, ces propositions sont sujettes à critiques (Voir commentaires de Reagan et Gray faites à Lee (2009), pp. 855 et 856 de cet article). Qu'ils soient structurels ou de contrôle, les invariants permettent de prélever l'information directement disponible et nécessaire au guidage de l'action sans faire appel à une reconstruction interne du monde et de son propre mouvement. En cela, l'approche écologique propose une alternative très économique du guidage de l'action. Cependant, la question de la redondance de l'information liée à la multiplicité des systèmes sensoriels (optique, acoustique, haptique, inertiel) face au processus de spécification, c'est-à-dire la correspondance univoque entre invariant et propriété du système, fait débat. Selon Gibson (1966), l'information pouvait être redondante et « amodale », autrement dit, disponible dans diverses modalités (bien que de fait ce mot perde alors beaucoup de sa signification), et selon Laurent, Montagne & Durey (1996) une même caractéristique de l'environnement peut être spécifiée par plusieurs aspects du champ perceptif ambiant (visuel par exemple) et induit donc une redondance intramodale. Toutefois cette spécification « dirigée » remet en cause le processus de spécification lui-même. En effet, si pour accéder aux propriétés du système sujet / environnement il faut prendre en compte plusieurs invariants distincts, alors, pour intégrer les différentes informations, force est d'ajouter dans le processus, une étape computationnelle fondamentalement incompatible avec le cadre théorique Gibsonien. Cela dit, la proposition d'une perception amodale suppose elle aussi un fonctionnement séparé de chacun des systèmes sensoriels qui restreint, là encore, l'acceptation d'une perception directe. Face à ces contradictions, Stoffregen & Bardy (2001) présentent, tout au moins du point de vue théorique, une alternative fort élégante. De façon à ce que la spécification soit à la fois unique et univoque et que l'information permette à l'organisme de produire de l'action, ces auteurs proposent de tenir compte du fait que, non seulement les propriétés du système sujet/environnement ont des conséquences sur différents flux énergétiques mais que les relations entre ces flux reposent elles aussi sur des invariants. La congruence entre les flux est donc elle-même informative. Ce que capte l'individu est alors dans le cas de la spécification ni plurimodale ni amodale mais un paysage énergétique multidimensionnel, « la globale array » (figure 8).

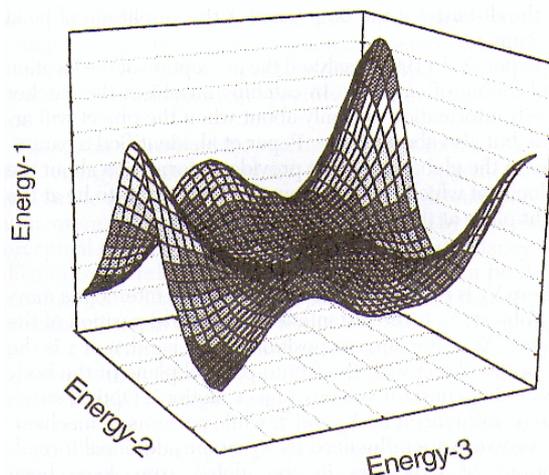


Figure 8 : Représentation « théorique » de la « global array » en fonction de 3 formes d'énergies (extrait de Stoffregen et Bardy, 2001).

Des premiers résultats obtenus à partir d'estimation par les sujets des possibilités d'atteinte de cible en conditions uni-modale ou de global array (vision et mouvement) semblent par ailleurs apporter un début de validation expérimentale et une formalisation mathématique est proposée (Mantel, Bardy & Stoffregen, 2005). Néanmoins, si cette approche de l'information explicite le rapport qu'un individu et son environnement entretiennent, elle ne répond pas à la question du processus de choix du mode d'action. Pour ce faire, l'approche écologique fait appel au concept d'affordances³⁴ proposé par Gibson (Gibson, 1977) .

Issues de l'idée gestaltiste de valence (une forme d'attirance ou non vers un objet concept, un peu à l'image de la valence des physiciens), les affordances représentent les possibilités d'action offertes par le couplage organisme / environnement (Jones, 2003; Niveleau, 2006). Une affordance en soit n'existe donc pas, elle existe seulement dans le cadre du couplage entre un individu (et ses caractéristiques) et l'environnement, dans une niche écologique³⁵. Ce qui est perçu n'est donc pas un ensemble de caractéristiques objectives du monde mais directement ce qu'il signifie en terme de possibilité d'actions sans que, là encore, le recours à une étape computationnelle ne soit nécessaire (Turvey, 1981). En fait, ce concept a évolué et a été objet de nombreux débats. Gibson lui-même propose des définitions plus ou moins précises qui mettent plus ou moins en avant la place du couplage sujet / environnement : « *Les affordances de l'environnement, sont ce qu'il offre à*

34 Probablement que l'anglicisme est conservé à la fois la car aucun mot français ne contient l'ensemble de ce qui est signifié par le verbe to afford et pour le néologisme qu'est le mot affordance lui-même.

35 Au sens gibsonien, « *une niche réfère plus à comment vit l'animal qu'à où vit l'animal. Je suggère qu'une niche est un ensemble d'affordances* »*, Gibson (1979, p.128).

l'animal, ce qu'il lui apporte ou fourni, que ce soit bon ou mauvais »³⁶ (Gibson, 1966, p. 127) ; *Toute combinaison spécifique des propriétés de substance et surface en référence à l'animal* »³⁷ (Gibson, 1979, p. 67). De plus, ce débat a largement continué à évoluer, et ce encore récemment (voir la revue de Luyat & Regia-Corte, 2009). En effet, une opposition apparaît entre la définition proposée par Shaw, Turvey & Mace (1982) (voir Turvey, 1992 pour une présentation sous forme de logique formelle³⁸) qui distinguent l'effectivité (ce qui potentiellement permet l'interaction organisme environnement) et l'affordance (ce qui dans l'environnement permet l'interaction) et celle proposée par Stoffregen, d'abord « *en prose* » (p. 116) puis, dans un deuxième temps, en logique formelle³⁹ (Stoffregen, 2003) qui cherche au contraire à ne pas distinguer sujet et environnement et partir des propriétés émergentes du système constitué de ces deux éléments. Cependant, cette dernière approche semble à certains auteurs (Kirlik, 2004) trop large ou ne tenant pas compte de l'évolution des affordances (Chemero, Klein & Cordeiro, 2003). Ces détails théoriques ne sont pas sans importance car de glissements en glissements, des usages abusifs du terme d'affordance, dans différentes disciplines, comme par exemple le design (Norman, 1999), finissent par lui faire perdre son sens Gibsonien en introduisant l'idée de mécanisme de traitement perceptif des affordances⁴⁰. Dans un cadre plus strictement écologique, et de manière plus générique, les affordances, en terme de possibilités d'action relativement aux caractéristiques de l'individu, vont guider l'action comme le montrent les études expérimentales de Warren (1984) sur la montabilité d'une marche, de Warren & Whang (1987) sur le franchissement d'une porte, de Wagman & Carello (2003) pour l'utilisation d'outils, en l'occurrence un bâton, celles-ci étant disponibles assez tôt au cours du développement tout au moins en modalité visuelle (Klevberg & Anderson, 2002). Enfin, il peut être noté que les

36 « *the affordances of the environment are what it offers the animal, what it provides or furnishes, either for good or ill* ».

37 « *anything is a specific combination of the properties of its substance and its surfaces taken with reference to an anima* ».

38 Définition de l'affordance et de l'effectivité selon Turvey (1992, p. 180)

Soit W_{pq} (un système d'un Individu qui monte des marches) = $j(X_p, Z_q)$ composé de différents éléments Z (Individu) and X (Marches).

Soit p une propriété de X et q une propriété de Z .

Alors p est une affordance de X et q une effectivité de Z (c'est à dire complément de p),

Si et seulement si il existe une troisième propriété r telle que :

(i) $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ possède r

(ii) $W_{pq} = j(X_p, Z_q)$ ne possède ni p ni q

(iii) Ni Z ni X ne possède r , et j est une fonction d'association ou de juxtaposition.

39 Définition de l'affordance selon Stoffregen (2003, p. 123)

Soit W_{pq} (e.g., un système personne - escalier) = (X_p, Z_q) composé de différents éléments Z (Individu) and X (Marches).

Soit p une propriété de X et q une propriété de Z .

La relation entre p et q , p/q , définit une propriété d'ordre supérieur (une propriété du système animal/environnement), h .

Alors h est une affordance de W_{pq}

Si et seulement si

(i) $W_{pq} = (X_p, Z_q)$ possède h

(ii) Ni Z ni X ne possède h .

40 Ce qui selon Norman lui-même « exaspérait » Gibson (Norman, 1999, p. 1).

affordances ne déterminent pas en elles-mêmes l'action, elles offrent des possibilités d'actions. Le comportement est « *ce qui apparaît à la conjonction d'affordances et d'intention ou buts complémentaires* »* (Stoffregen, 2003, p. 126).

En rejetant la distinction classique entre une motricité physique et une perception mentale, Gibson (1979) déduit alors que « voir » est en fait « voir comment aller vers » et utiliser les affordances. Dans ce cas, la vision est au service du comportement mais réciproquement le comportement est au service de la vision. Ce couplage insécable entre perception et action (de la même manière que sujet et environnement sont inséparables) a été résumé par Gibson en une phrase très souvent citée : « *so, we must perceive in order to move, but we must also move to perceive* » (Gibson, 1979, p. 223). Flux informationnel et action produite par le sujet ne sont ni la cause ni la conséquence l'une de l'autre ou le plus souvent, sont à la fois cause et conséquence. La relation entre perception et action n'est donc pas hiérarchisée, dans le sens où l'une ne précède pas nécessairement l'autre mais est cyclique. Dans ce couplage, le lien entre action et perception met en jeu des flux énergétiques faibles alors que celui entre la perception et l'action met en jeu des flux (cinétiques) importants (Kugler & Turvey, 1987, p. 88) et la perception et l'action se modifient mutuellement. Ces propositions ont reçu des validations expérimentales à travers, par exemple, les travaux de Warren *et al.* (2001) sur le guidage visuel de la locomotion dans un environnement virtuel (permettant ainsi de faire varier le flux optique), de la pose du pied sur la première marche d'un escalier (de Rugy *et al.*, 2002) ou encore lors de la course d'élan en saut en longueur (Lee, Lishman & Thomson, 1982). Ces régulations ne se font pas nécessairement tout au long de la réalisation du mouvement mais plutôt lorsque l'atteinte du but est en jeu. Le contrôle se fait alors en « entonnoir » (Bootsma, Houbiers, Whiting & van Wieringen, 1991) : plus les régulations à faire sont importantes, plus elles apparaîtront précocement avant l'atteinte du but (Montagne *et al.*, 2000). Par ailleurs, il a été montré que même pour des mouvements (un salto arrière) de durée inférieure au temps estimé nécessaire par les cognitivistes pour un contrôle en feed-back (Schmidt, 1993), une régulation visuelle s'opère (Bardy & Laurent, 1998). Le lien entre variables perceptives et variables motrices peut alors être exprimé à travers les « lois de contrôle » (Warren, 1988). A l'origine de ces lois se trouvent les formules qui décrivent l'interaction entre l'animal et l'environnement proposées par Gibson (1958) et citées plus avant dans le texte. Puis Warren (1988) utilisa ensuite le terme de « lois » « *pour souligner leur existence irréductible et systématique dans la relation entre l'information et le comportement* » (Bardy & Mantel, 2006, p. 55). Selon Warren (1988), il est possible de traduire en équation⁴¹ ces lois de mise en relation d'une information et d'une force qui résumant la complexité d'un comportement finalisé, comme dans le cas de la loi de spécification.

41 Equations du type $force = g(\text{flux})$ avec g : constante gravitaire.

Cependant, les forces produisant le flux optique provenant à la fois du sujet mais aussi de l'environnement (collision par exemple), Warren décompose les termes de l'équation en forces externes et forces internes⁴². Toutefois, ce principe ne permet pas à l'individu de distinguer la part du flux provoquée par les forces internes appliquées par lui-même ou liées à des perturbations extérieures qu'il lui faudra compenser. Rejetant, en référence à Gibson, l'hypothèse d'une copie d'efférence, et en s'appuyant sur le principe de spécification, Warren (1988) propose que cette compensation ne dépend pas de la source de variation du flux. Quelle que soit l'origine de la variation (forces internes, forces externes ou mouvement dans les surfaces qui composent l'environnement) dans le flux, l'action sera spécifiée, donc non ambiguë, et relative à l'objectif de l'action. Par conséquent, la formalisation de ces lois devait intégrer l'aspect fonctionnel des variations dans le flux⁴³. Ces formalisations et validations empiriques qui s'y rattachent ont été appliquées à différents domaines perceptivo-moteurs. Par exemple, Warren (1986) a montré que le contrôle de la foulée (en l'occurrence sur un tapis roulant, sur lequel les sujets devaient courir en plaçant leurs appuis sur des repères irrégulièrement espacés) se faisait à travers l'impulsion verticale qui détermine le « temps de vol⁴⁴ ». Ces principes ont aussi été appliqués et ont trouvé validation dans des tâches d'interceptions de mobiles (Beek, Dessing, Peper & Bullock, 2003; Le Runigo, Benguigui & Bardy, 2005; Montagne, Laurent, Durey & Bootsma, 1999). La sélection du choix des lois de contrôle serait alors contrainte par le contenu (par la richesse) de la scène visuelle (Morice, Francois, Jacobs & Montagne, 2010). Le champ théorique initié par Gibson offre donc à ce jour une perspective (qui s'appuie à la fois sur une épistémologie, des formalisations et des données empiriques) alternative au cognitivisme quant à la question des relations entre perception et action. Et plus généralement, aux questions initiales du rapport entre perception et action, du choix de l'action finalisée, de la production et de la coordination du mouvement, une approche du monde du point de vue de la complexité propose donc des réponses qui, si elles peuvent encore en partie paraître incomplètes et soulever des critiques (Fajen, 2005), permettent de dépasser les limites intrinsèques du cognitivisme évoquées plus avant.

42 Ce qui donne alors : $F_{ext} + F_{int} = g(\text{flux})$, avec F_{ext} et F_{int} , forces externes et internes, respectivement.

43 $\Delta F_{int} = g(\Delta \text{flux})$, avec Δ : variation.

44 Formalisé de la manière suivante : $D = I / mg$ avec D : durée de la foulée, I : impulsion verticale, m : masse, g : constante gravitaire et $I = mg\Delta\tau$ avec $\Delta\tau$ différence de tau (temps de pré-contact) sur deux repères à venir.

3.3. Systèmes complexes et posture

Bien entendu, du point de vue complexe, et en référence aux idées présentées ci-dessus quant au contrôle moteur, la coordination posturale ne peut être envisagée comme le fruit d'un système qui agit en prescrivant en fonction d'informations recueillies par chacune des modalités perceptives puis intégrées d'une représentation interne, et de boucles de rétro-action. En effet, si la posture doit se comprendre en terme de couplage entre perception et action, alors l'étude de chacune des étapes proposées par le cognitivisme perd son sens. Et de fait, une rupture radicale apparaît lorsque, Stoffregen & Riccio (1988) remettent en cause la notion même d'orientation au sens classique (Mittelstaedt, 1983), c'est-à-dire la capacité à envisager la verticalité en tant que résultante de la coopération de différents systèmes perceptifs étant chacun susceptible d'indiquer l'axe gravitaire (Howard & Templeton, 1966) et qui sert de base au contrôle postural. Leurs arguments s'appuient sur plusieurs points dont les deux principaux concernent le système vestibulaire. En effet, alors que les otolithes sont traditionnellement considérés comme des percepteurs de gravité au service, entre autres, de la régulation posturale, ces deux auteurs rappellent que, ces récepteurs étant des détecteurs d'accélération, dès que le segment céphalique est en mouvement, il n'est pas possible à partir des informations vestibulaires de distinguer les forces liées au mouvement en lui-même et celles liées à la gravité. De plus, à travers une revue des études réalisées sur la perception de la verticale en immersion (qui est selon eux le meilleur moyen d'isoler la composante somato-sensorielle), ils montrent que le système vestibulaire ne permet pas, à lui seul de déterminer l'axe gravitaire. Ils en déduisent alors que, pour comprendre les déterminants de la régulation posturale, on ne peut parler de perception de la verticale en soi (elle n'existe qu'en fonction de l'action en cours), et que la régulation posturale dépend de la surface sur laquelle elle est exercée et de ses qualités (taille, résistance à la déformation, friction qui évite ou non de glisser, relation avec force de gravité qui doit permettre à l'organisme de se maintenir, parfois au prix de l'application de forces). Certaines surfaces donneront l'affordance de se tenir dessus, d'autres non. Comme le propose l'approche écologique, ces auteurs considèrent que l'information émerge alors de l'interaction entre l'organisme et la surface. De plus, ces mêmes auteurs (Riccio & Stoffregen, 1990) proposent que, puisque les changements d'orientation peuvent être liés à différents mouvements (par exemple un déplacement de la tête détecté peut être dû à un mouvement articulaire du cou ou du buste), les aspects cinématiques doivent aussi être pris en compte et que, par conséquent, plus qu'une analyse quantitative traditionnelle (à travers le centre de pression), une analyse géométrique des configurations et de leurs transitions est nécessaire à la compréhension de la régulation posturale.

L'autre postulat original de l'approche écologique en la matière, et non des moindres, est de rappeler que le maintien de la posture pour elle-même est très rare (Balasubramaniam, Riley & Turvey, 2000; Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999). Au contraire, en posture érigée, elle est au service de et contrainte par la tâche à réaliser (appelée tâche supraposturale) comme par exemple attraper un objet, fixer et lire un texte (Smart *et al.*, 2004) ou simplement pour faciliter la recherche visuelle (Stoffregen, Pagulayan, Bardy & Hettinger, 2000). L'efficacité d'une stratégie posturale est donc définie en terme de conséquences pour l'action et la stabilité comme l'état dans lequel les mouvements incontrôlés dans le couplage perception / action (et les flux qu'il génère nécessairement) sont minimisés (Sparrow & Newell, 1998). L'action d'orienter le corps sur terre émerge donc de l'interaction entre trois contraintes, la surface de support, les propriétés de l'organisme et le but de la tâche (voir figure 9), cette dernière étant la plus importante (Riccio & Stoffregen, 1990).

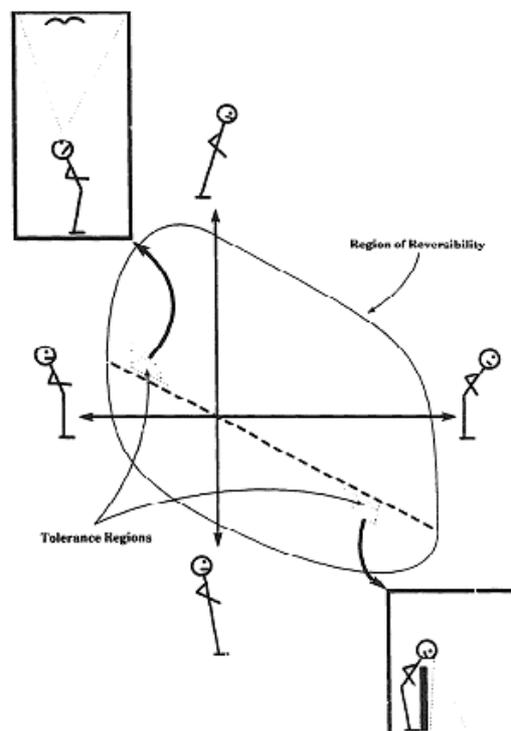


Figure 9 : *Coordinations hanche / cheville potentielles et comportements émergents en fonction de deux buts : regarder un oiseau dans le ciel et regarder par dessus une barrière (extrait de Riccio et Stoffregen, 1988).*

Le contrôle postural ne consiste donc pas en une recherche permanente d'une minimisation des oscillations mais en un compromis permanent entre l'effort et la stabilité. Par exemple, pour mieux détecter la cible, des archers placés de profil oscillent plus dans le plan médio-latéral et

réduisent les mouvements dans le plan antéropostérieur (Balasubramaniam, Riley & Turvey, 2000). Ces oscillations permanentes génèrent alors du flux multi-sensoriel. Le terme multi-sensoriel, qui sous-entend une indépendance des différentes modalités, peut paraître contradictoire avec les arguments de Stoffregen & Bardy (2001) concernant la « global array » évoqués précédemment. Toutefois, la question n'a guère été abordée dans le cadre de l'étude de la posture et le lien entre flux perceptif et action posturale a le plus souvent été envisagé à travers le prisme du seul flux optique grâce à la procédure expérimentale de la « moving room ». Ce dispositif, qui consiste à placer le participant dans un environnement dont les murs ou le plancher peuvent être déplacés générant ainsi du flux optique, a été par la suite remplacé par des environnements virtuels projetés sur un écran ou dans un masque. De nombreuses expérimentations montrent que la génération de flux optique par l'activation de la « moving room » induit chez les participants un « accompagnement » de l'environnement sans qu'ils en aient l'intention (Bardy, Warren & Kay, 1996; Baumberger, Isableu & Flückinger, 2004; Stoffregen, 1985; Stoffregen, 1986). Qui plus est, ces adaptations posturales apparaissent, que la tâche supraposturale soit de suivre la cible (Stoffregen, Smart, Bardy & Pagulayan, 1999) ou de simplement la regarder (Stoffregen, 1985). Ce mouvement, orienté dans le même sens que le flux généré, tend à minimiser les dilatations et contractions qui apparaissent dans le flux optique et montre que l'expansion optique et la parallaxe qui spécifient vitesse, accélération et position du corps relativement à l'environnement, sont les invariants fondamentaux du contrôle visuel de la posture (Bardy, Warren & Kay, 1996). Si ces résultats mettent en évidence le couplage perception / action dans la régulation posturale et montrent l'influence des invariants, ils n'en amènent pas moins à s'interroger quant à la multimodalité envisagée du point de vue écologique. En effet, puisque le flux manipulé est exclusivement visuel (et donc sans conséquence directe kinesthésique, vestibulaire ou somato-sensorielle), il peut sembler étonnant qu'une action se mette ainsi en place en réponse à la stimulation. En fait, la contradiction n'est qu'apparente puisque d'une part, selon Stoffregen & Bardy (2001), la congruence tient dans l'évolution relative des différents flux les uns par rapport aux autres et que d'autre part, le mouvement généré crée lui aussi du flux (Baumberger, Isableu & Flückinger, 2004). Cette interprétation semble confirmée par le fait que lorsque le flux appliqué est acoustique (Stoffregen *et al.*, 2009), le même type de résultat est observé. De plus, lorsqu'il est demandé à des participants si, en fonction de son inclinaison, une surface permet le maintien de la posture érigée, les réponses données ne dépendent pas de la modalité (visuelle ou haptique) engagée (Regia-Corte, Luyat, Darcheville & Miossec, 2004) suggérant alors l'intervention d'une information amodale.

Une autre méthodologie, radicalement différente, a été mise en oeuvre dans le but d'explorer

le lien entre flux et mouvement postural. Il s'agit dans ce cas de qualifier l'effet des perturbations perceptives multimodales sur la structure temporelle de la régulation posturale (Riley, Balasubramaniam & Turvey, 1999; Clark & Riley, 2006; Riley & Clark, 2003; Schmit, Regis & Riley, 2005). La variable dépendante choisie est le centre de pression et les manipulations perceptives consistent à faire varier la présence de vision (yeux ouverts vs. fermés), la nature de l'environnement visuel (fixe vs. qui suit les oscillations posturales) et la surface (rigide vs. souple). Le traitement appliqué aux déplacements du CdP, la Recurrence Quantification Analysis (RQA) qui est un outil de l'analyse chaotique du signal, permet de quantifier la récurrence, le déterminisme et la dérive du signal au cours des essais⁴⁵. Les résultats de ces différentes études montrent que plus la situation perceptive est perturbée plus le signal postural est déterminé, c'est-à-dire non stochastique. Cela indique ainsi l'influence de l'organisation du flux perceptif sur la structure spatio-temporelle des déplacements du CdP. Si les deux types de méthodologies amènent à valider empiriquement les propositions théoriques en terme de couplage perception / action dans la régulation posturale, l'usage de «perturbations» et de ce qui est entendu par là est sujet à débat. En effet, dans une réponse à un article de Creath *et al.* (2005), Bardy, Lagarde, Oullier & Stoffregen (2007) remettent en cause l'idée même de perturbation. En effet, selon ces auteurs, il n'existe pas de définition claire de ce qu'est ou n'est pas, de manière générique, une perturbation, et que, par exemple, le fait de suivre, en posture érigée, une cible avec la tête peut ou non être considérée ainsi en fonction du type de question posée qui dépend elle-même du cadre ontologique et théorique de l'étude.

Par ailleurs, si ces différents travaux informent sur le lien entre flux et force et sur les contraintes qui agissent sur la posture et, au delà, sur la manière de la mettre en place (par exemple, le fait d'être sur un bateau modifie la distance et l'angle entre les pieds, (Stoffregen, Chen, Yu & Villard, 2009), ils ne renseignent pas quant à la façon dont la réponse posturale est produite. En effet, les explications classiques en terme de prescription de stratégies de chevilles pour de faibles perturbations, et de hanches lorsqu'elles sont plus amples ou de fréquence plus élevée (Nashner & McCollum, 1985), offrent l'avantage de résoudre en partie la question de la gestion des degrés de liberté (Bernstein, 1996; Turvey, 1990). Toutefois, elles ne sont pas compatibles avec le cadre théorique des systèmes complexes. De plus, selon Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999), des ambiguïtés quant à l'usage concomitant ou non des stratégies de hanche et de cheville apparaissent dans la littérature. En effet, des auteurs qui s'intéressent aux aspects biomécaniques (McCollum & Leen, 1989), pathologiques (Horak, Nashner & Diener, 1990) ou au contrôle de la posture (Horak & Nashner, 1986; Nashner, Shupert, Horak & Black, 1989) considèrent l'exclusivité d'une stratégie ou de l'autre alors que dans les travaux de Nashner & McCollum (1985) auxquels ils se réfèrent, il est

⁴⁵ Des détails concernant la RQA sont donnés en ch. 5.

précisé qu'il est question de dominante et non d'unicité. De plus, un certain nombre de données empiriques montrent une activité concomitante des chevilles et des hanches (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999; Horak, Nashner & Diener, 1990; Stoffregen *et al.*, 1997). Classiquement, la réponse donnée à l'apparition de rotation de hanche durant une activité de type stratégie de chevilles est qu'il faut la considérer comme du bruit incontrôlé non fonctionnel (Horak & Nashner, 1986). Sans doute que, comme le font remarquer Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999), cette ambiguïté vient du fait que la mise en évidence des stratégies s'est faite à travers l'analyse de variables de différents niveaux, telle que l'activité musculaire (Nashner & McCollum, 1985), les mouvements articulaires (Horak & Nashner, 1986) ou les forces générées par l'activité posturale sur la surface support (Horak, Nashner & Diener, 1990) dont il est connu que les relations ne sont pas univoques (Bernstein, 1967). Il a donc été proposé, à travers une série d'études, de décrire d'un point de vue macroscopique et dynamique la coordination posturale (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999; Marin *et al.*, 1999; Oullier, Bardy, Stoffregen & Bootsma, 2002). Dans ces recherches, il est proposé que la coordination posturale peut être résumée aux mouvements simultanés des chevilles et des hanches qui fonctionneraient comme des oscillateurs asymétriques couplés. Ils demandent donc aux participants, placés debout, les mains dans le dos de suivre avec la tête une cible qui oscille selon différentes amplitudes (paramètre de contrôle qui peut aussi être la fréquence) dans le plan antéro-postérieur, et calculent la phase relative (paramètre d'ordre) des mouvements angulaires des hanches et des chevilles recueillies grâce à des goniomètres. Deux modes de coordination spontanée lors de ce type de tâche émergent alors. Pour de faibles amplitudes d'oscillation de la cible, un mode en phase (plutôt vers les 20° de phase relative) dans lequel hanches et chevilles oscillent dans la même direction est observé alors que pour les plus grandes amplitudes un mode en antiphase (180°) apparaît (figure 10).

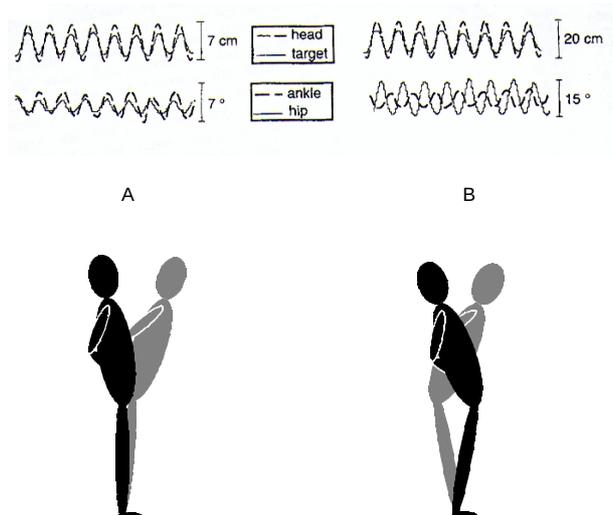


Figure 10 : Coordination en phase (à gauche) et antiphase (à droite).
Extrait de Bardy et al. (1999)

Au delà du fait qu'ils remettent empiriquement en cause la théorie du « pendule inversé » pour les faibles perturbations, ces résultats semblent concordants avec ceux observés dans les coordinations bimanuelles présentées plus haut et peuvent être interprétés en terme d'émergence de différents patrons en fonction des contraintes. Dit autrement, deux modes de coordination posturale émergent en fonction des conditions. Cependant, dans le couplage hanches-chevilles, la relation en phase ne s'établit pas à zéro degré mais plutôt aux alentours de vingt et contrairement aux oscillateurs mis en jeu dans les coordinations bimanuelles, le système hanche / cheville n'est pas symétrique : les segments mis en jeu ont des masses et longueurs différentes ce qui induit de moins bonnes stabilité et précision du couplage (Kelso & Jeka, 1992; Baldissera, Cavallari, Marini & Tassone, 1991). De leur côté, Fourcade, Bardy & Bonnet (2003) interprètent ce résultat en considérant que contrairement à ce qui se passe dans les coordinations bimanuelles, les mouvements des membres inférieurs et du tronc ont, au niveau mécanique, des influences réciproques mises au service du maintien de l'équilibre.

Au delà de déterminer l'existence de deux types de phase relative, Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999) et Marin *et al.* (1999) se sont aussi attachés à montrer que la coordination hanche / cheville qui émerge est le fruit non pas d'une stimulation mais de l'interaction entre les différents types de contraintes comme le proposent Newell (1986) pour la motricité en général ou Riccio & Stoffregen (1990) pour la posture en particulier. Dans le même type de protocole, en croisant deux variables, à savoir l'ajout d'une masse à différentes hauteurs du corps (cou ou genoux) et quatre conditions d'amplitude du mouvement de la cible, Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999)

montrent que seuls deux patrons (phase et anti-phase) émergent et que le mode mis en jeu dépend de l'interaction entre les deux contraintes imposées. Les mêmes conclusions ont été tirées par les mêmes auteurs lorsqu'ils ont fait varier la longueur de la surface d'appui et par Marin *et al.* (1999) lorsqu'ils ont fait varier les caractéristiques de la surface d'appui (sur des patins ou sur une surface plus ou moins souple). Dans tous les cas de figure, lorsque les conditions de maintien de la posture évoluent vers plus de précarité, le passage se fait d'une coordination en phase vers une coordination en anti-phase. Les résultats observés lors d'une augmentation de l'amplitude d'oscillation de la cible à suivre le sont de la même manière lorsque c'est la fréquence qui est manipulée. Qui plus est, avec le même type de dispositif, Oullier, Bardy, Stoffregen & Bootsma (2002) ont montré que des résultats similaires étaient observés que le sujet suive la cible ou simplement la regarde osciller bien que le couplage hanche / cheville et l'amplitude des mouvements articulaires soient moins importants dans la seconde condition. Si la régulation posturale peut être envisagée comme un système complexe dont les modes de coordinations émergent de l'interaction des contraintes de l'organisme, de l'environnement et de la tâche, cette dernière pose la question de l'intention. Cette part du problème n'est pas anodine puisqu'elle concerne l'acte volontaire (et aussi l'apprentissage) alors qu'une des critiques souvent émises quant à l'approche dynamique est sa « (bio)mécanisation » de la motricité et, au-delà, celle de la place du contrôle moteur et postural du point de vue des systèmes complexes dans le champ de la psychologie. Différentes études (Faugloire, Bardy & Stoffregen, 2006; Faugloire, Bardy, Merhi & Stoffregen, 2005; Faugloire, Bardy & Stoffregen, 2009) montrent que l'intention permet, à l'aide de dispositifs de feed-back ou non, de produire différents types de coordination. L'apprentissage de ces nouveaux patrons (135°) n'est pas sensiblement affecté par la stabilité des patterns initiaux observés en pré-tests chez les participants mais, en revanche, ces derniers sont influencés durablement par l'apprentissage de coordinations « non spontanées » (Faugloire, Bardy & Stoffregen, 2006). Par ailleurs, le fait d'apprendre de nouveaux patrons induit une meilleure performance générale qui se traduit par plus d'homogénéité dans la production de différents patrons (Faugloire, Bardy & Stoffregen, 2009). Toutefois, on peut noter que, lorsque l'on propose à des sujets de réaliser différents types de coordinations hanche / cheville, le patron en antiphase apparaît spontanément contrairement au patron en phase (Faugloire, Bardy, Merhi & Stoffregen, 2005). Comme dans cette étude les instructions concernaient la coordination en elle-même et non la tâche à réaliser (suivre la cible dans la plupart des études précédemment citées), les auteurs en concluent que les instructions (et par conséquent l'intention) influencent fortement le comportement postural. L'interaction entre l'intention et le paramètre de contrôle conduit de plus à modifier la stabilité de l'organisation posturale, celle-ci étant connue pour être plus grande pour les fortes ou faibles valeurs du paramètre de contrôle et au contraire plus

faible pour des valeurs intermédiaires (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999; Marin *et al.*, 1999). De ces différents travaux, il est possible de conclure provisoirement que l'on retrouve empiriquement dans la coordination posturale un certain nombre d'éléments qui caractérisent un système dynamique : multistabilité (phase relative vers 20 et 180 degrés), instabilité pour des valeurs intermédiaires du paramètre de contrôle (bien qu'à ce stade rien ne montre que cette instabilité précède une transition). Toutefois, pour être défini comme système dynamique en tant que tel, la coordination posturale devrait aussi répondre à trois autres signatures que sont les transitions, l'existence du phénomène d'hystérèse et de modifications du temps de relaxation.

Pour ce faire, Bardy, Oullier, Bootsma & Stoffregen (2002) ont repris le même type de dispositif en augmentant et diminuant la fréquence d'oscillation de la cible à suivre avec la tête. A partir de l'analyse de la phase relative hanche / cheville et en utilisant la méthode du point estimé (Zanone & Kelso, 1992a), ils ont montré de nouveau l'existence de deux états stables, deux attracteurs, ainsi que la soudaineté du passage de la phase à l'antiphase (ou inversement dans la condition où la fréquence diminuait). De plus, une étude détaillée des fréquences de transition ainsi que du comportement du paramètre d'ordre aux alentours de cette dernière a aussi permis de mettre à jour l'existence du phénomène d'hystérèse et à nouveau celle de fluctuations critiques. Dans une deuxième expérimentation, ils ont perturbé le système en imposant un soudain changement de direction de 180° dans le déplacement antéropostérieur de la cible. Comme le proposait leur hypothèse, un temps de relaxation (le temps nécessaire à retrouver un état stable) plus important à l'approche des fréquences correspondant aux transitions de phase apparaît ainsi qu'une plus grande stabilité du patron en phase relativement au patron en anti-phase. Il ressort donc de l'ensemble que la coordination posturale répond aux caractéristiques attendues d'un système dynamique et peut donc dès lors être considérée comme tel. Ceci étant dit, la connaissance, à ce stade, des processus sous-jacents qui déterminent l'émergence d'une coordination posturale reste pour le moins limitée. Cela tient sans doute en grande partie au fait que, comme évoqué plus tôt, il n'est guère possible dans un système complexe de remonter aux conditions initiales à partir d'un comportement final global. Toutefois, différentes pistes sont évoquées (Oullier *et al.*, 2006; Bardy, Oullier, Bootsma & Stoffregen, 2002). Tout d'abord, les transitions peuvent être expliquées par des limites de nature mécanique à différents niveaux du système postural. Par exemple, des limites au niveau des articulations (Yang, Winter & Wells, 1990), des fréquences maximum d'oscillation (Buchanan & Horak, 1999) ou encore des limites tout simplement d'amplitude d'oscillation (Riccio & Stoffregen, 1990) expliqueraient parfaitement la nécessité du passage d'un pattern à l'autre. Toutefois, cette explication seule ne semble pas suffisante. En effet, les résultats expérimentaux montrent « *qu'un*

unique mode [de coordination] peut être utilisé dans différentes conditions biomécaniques et différents modes pour une seule condition »* (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999, p. 1298). De plus, si l'on resitue le débat au niveau des modèles, il semble difficile d'expliquer les transitions dans un modèle dynamique à partir de la mécanique classique Newtonienne (Beek, Peper & Stegeman, 1995). Une autre piste d'explication du comportement postural pourrait se faire à travers les coûts énergétiques. En effet, en étudiant les patrons locomoteurs, Hoyt & Taylor (1981) ont montré (chez le « petit » cheval) que le mode de locomotion naturellement adopté, quelle que soit la vitesse, correspond à la plus petite dépense énergétique. Il semble alors raisonnable de considérer qu'il est possible d'adapter ce principe aux transitions posturales : quand un pattern devient peu efficient, le système passe à un autre et, comme le suggèrent Corna *et al.* (1999), adopte en fonction des conditions, le pattern le moins coûteux et qui permet de maintenir l'équilibre. Néanmoins, cette explication ne peut non plus être satisfaisante à elle seule pour au moins trois motifs. D'une part, si l'on considère que la posture n'existe pas (le plus souvent) pour elle-même mais qu'elle est au service de la réussite d'une tâche supraposturale (Stoffregen, Smart, Bardy & Pagulayan, 1999), alors le problème de l'individu est plus de trouver le bon compromis entre réussite dans la tâche et coût énergétique (Sparrow & Newell, 1998) que dans une simple recherche d'efficience (Riccio & Stoffregen, 1990). D'autre part, si Diedrich & Warren (1995), en ce qui concerne là encore la marche, ont montré un lien fort entre coût énergétique et transition d'une coordination à l'autre, ils ont aussi montré qu'à l'approche de la transition il n'y a pas nécessairement correspondance entre les deux. Enfin, le troisième motif tient dans notre expérience quotidienne. Chacun a, un jour, « retenu » le passage de la marche à la course ou a pu observer ce principe chez des marcheurs athlétiques. Ce dernier argument est certes discutable, d'autant plus s'il est question de « posture spontanée », mais montre au moins que si les coûts énergétiques peuvent déclencher la transition, il ne les déterminent pas entièrement. La troisième piste d'explication des transitions posturales tient dans le changement des informations disponibles. En effet, des manipulations de l'information disponible modifient l'organisation posturale (Allum *et al.*, 1998; Horak, 2006) et les stimulations optiques induisent des oscillations dans la direction du stimulus (Megrot, Bardy & Dietrich, 2002). Néanmoins, l'argument inverse du précédent, à savoir que des transitions sans modifications de l'information existent, amène aussi à rejeter un rôle de déterminant de l'information dans les transitions. En fait, qu'aucune de ces trois pistes ne permette à elle seule d'expliquer le comportement postural et ses déterminants ne fait que donner un peu plus de poids à l'intérêt d'une compréhension en terme de systèmes complexes de la régulation posturale. De ce point de vue, comme le proposait Newell (1986), c'est l'interaction entre les contraintes qui fait émerger le mode adopté : « nous considérons l'interaction simultanée de différents types de

contraintes comme étant une caractéristique fondamentale du contrôle postural »* (Riccio & Stoffregen, 1990, p. 274). Et comme le proposent les théories des systèmes complexes en général, il est vain d'essayer de comprendre l'ensemble à partir de chacune des parties ou des relations que des parties entretiennent entre elles. Bien que n'étant pas exempt non plus de critiques et de limites (voir chapitre 3.5.), une compréhension du contrôle de la posture à travers la théorie du couplage perception / action et les modèles dynamiques offre une alternative tout à fait convaincante et empiriquement documentée aux modèles cognitivistes. D'un point de vue « complexe », des travaux concernant la posture et qui ont eu pour support l'expertise dans une activité sportive, la gymnastique, ont été réalisés sous ma direction.

3.4. Contributions personnelles dans ce domaine⁴⁶

La question abordée ici n'est pas celle de la gymnastique en elle-même, qui est une activité support comme pourrait l'être une autre. Cette activité a été choisie car elle offre un double intérêt : d'une part, elle est déjà documentée dans la littérature scientifique en matière de lien avec la posture érigée (Nouillot & Natta, 2004; Rougier, Gelat & Caron, 1998; Clement & Rezette, 1985; Slobounov & Newell, 1996; Pozzo, Clement & Berthoz, 1988; Clement, Pozzo & Berthoz, 1988; Vuillerme & Nougier, 2004; Asseman, Caron & Cremieux, 2008; Balter, Stokroos, Akkermans & Kingma, 2004; Bringoux *et al.*, 2000) et, d'autre part, c'est une activité qui, dans la réalisation de la performance met en jeu l'équilibre ainsi que, comme cela a été vu dans les parties précédentes, des postures arbitraires telles que l'ATR. La question n'est pas non plus celle de l'expertise en elle même et de ce qui la définit (voir Chi, 2006 ou Williams & Ericsson, 2005; Ericsson, 2008) ni de déterminer comment cette expertise peut modifier le comportement dans une activité spécifique comme nous avons pu le faire par ailleurs pour l'habileté particulière qu'est l'ATR (Gautier, Thouvarecq & Chollet, 2007; Gautier, Marin, Leroy & Thouvarecq, 2009). L'intérêt de l'expertise gymnique se trouve, ici, dans la durée de pratique que la performance suppose, en particulier dans ce sport exigeant, pour lequel de nombreuses années avec des volumes d'entraînement souvent importants sont nécessaires. Ces caractéristiques devaient permettre de déterminer comment une contrainte particulière de l'organisme, à savoir une pratique sportive intensive, en interaction avec celles de la tâche et de l'environnement, détermine l'émergence de caractéristiques posturales spécifiques dans une pratique posturale non gymnique.

La première approche, en utilisant le paradigme classique de la « *moving room* », concernait la manière dont cette pratique peut (ou non) modifier le couplage perception / action et, par

⁴⁶ Les deux illustrations qui seront évoquées dans cette partie font références à deux publications (Gautier, Thouvarecq & Vuillerme, 2008; Gautier, Thouvarecq & Larue, 2008) extraites de la Thèse de Doctorat, réalisée sous ma direction et soutenue par M. Gautier en 2007.

conséquent, du point de vue comportemental, la manière d'exploiter les lois de contrôle. Dans la deuxième, l'objet était de déterminer si des changements dans l'organisation posturale face au déséquilibre étaient induits par la pratique. En effet, face à cette question, l'étude de la littérature montre des contradictions. Certaines études indiquent que les performances dans le maintien de la posture érigée classique sont améliorées par la pratique de la gymnastique (Marin, Bardy & Bootsma, 1999; Vuillerme & Nougier, 2004; Vuillerme *et al.*, 2001) mais aussi par la pratique d'autres activités sportives mettant en jeu l'équilibre telles que le judo (Perrin, Deviterne, Hugel & Perrot, 2002) ou la danse (Schmit, Regis & Riley, 2005). Toutefois, d'autres publications qui s'appuient sur l'exemple de la gymnastique (Asseman, Caron & Cremieux, 2008) ou de la danse (Hugel, Cadopi, Kohler & Perrin, 1999) concluent que les modifications induites par la pratique ne concernent que les postures spécifiques propres à l'activité concernée, ce qui amène à modérer le propos. Ces apparentes contradictions peuvent être expliquées, si l'on se place du point de vue écologique par le fait que les méthodes employées ne permettent pas de répondre à la question (à l'exception de Marin, Bardy & Bootsma, 1999 et Schmit, Regis & Riley, 2005). En effet, dans la plupart des cas, les auteurs ont comparé les performances de gymnastes et non gymnastes dans des tâches de maintien de la posture érigée, en situation isolée, sur une plate-forme stabilométrique en conditions yeux ouverts et yeux fermés. Autrement dit, la posture étudiée n'était pas au service d'une tâche supraposturale et ne mettait pas réellement en jeu, n'induisait pas, de variations dans le couplage perception / action.

La tâche proposée dans notre laboratoire (Gautier, Thouwarecq & Larue, 2008) fut donc pour des gymnastes experts et des non gymnastes (mais pratiquants de sports collectifs ou de raquette de façon à isoler un éventuel effet de la pratique sportive en général ou d'activités dans lesquelles l'équilibre postural ne participe pas autant à la réalisation de la performance) de fixer le point de fuite d'un couloir infini projeté sur un écran dans une pièce noire. La texture du couloir était composée de points blancs sur fond noir et, par expansion de ceux-ci, un flux optique donnant l'illusion d'un déplacement des murs en direction du participant pouvait être généré. Pour chacun des trois essais par participant, la texture était immobile durant 20 secondes, puis (sans qu'il n'en soit prévenu) un déplacement apparent vers le participant était généré durant 30 secondes puis à nouveau durant 20 secondes le motif était fixe. Durant chaque essai, les déplacements du centre de pression (CdP) sur l'axe antéro-postérieur ainsi que ceux de la tête ont été relevés. L'effet des transitions (début ou arrêt du flux) était évalué, pour la tête et le CdP, par la latence de retour à un état stable (définie par le maintien durant 10 secondes dans deux écarts-types autour de la position moyenne de la condition en cours). Par ailleurs, la variabilité du CdP et de la position de la tête étaient elles aussi relevées (figure 11).

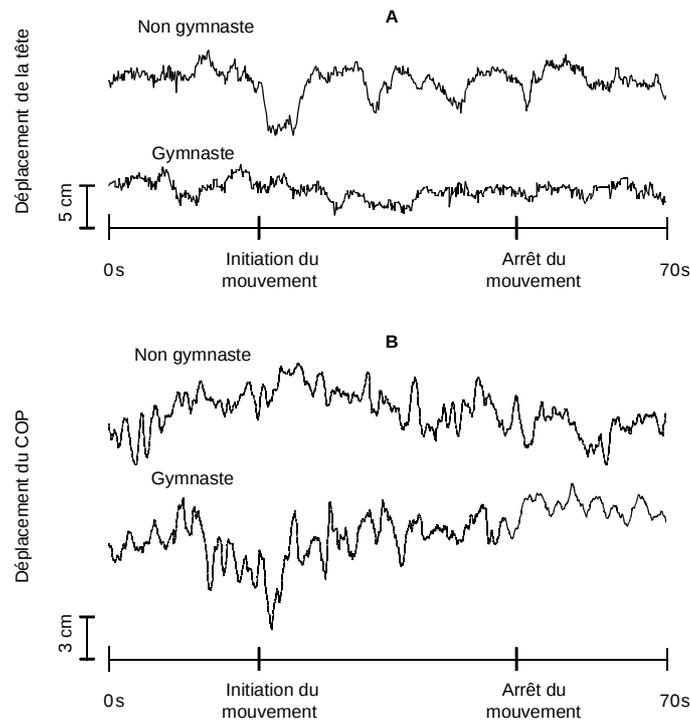


Figure 11 : Exemple de déplacements sur l'axe antéro-postérieur de la tête (en haut) et du CdP (en bas) pour un participant gymnaste et un participant non gymnaste (extrait de Gautier et al., 2008)

Pour ce qui est des latences des déplacements du CdP après transition, les résultats indiquent que les gymnastes se stabilisent significativement plus vite après l'arrêt du flux que les non gymnastes alors que c'est l'inverse après son initiation. De plus, si la latence est pour les non gymnastes significativement plus importante après arrêt du flux que lors de son initiation, ce n'est pas le cas pour les gymnastes. Par ailleurs, pour les deux transitions, les latences des oscillations de la tête sont significativement moins importantes pour les gymnastes que pour les non gymnastes et, seulement pour ces derniers, la latence est plus grande après arrêt du flux que lors de son initiation. En ce qui concerne la variabilité du CdP, aucun effet que ce soit de l'expertise, de la condition (en approche ou immobile), ou d'interaction n'est significatif. En revanche, si en condition « fixe » les oscillations de la tête des gymnastes et des non gymnastes ne sont pas significativement différentes, elles sont (significativement) plus importantes pour ces derniers lorsque le flux optique est généré. Dans cette dernière condition, les oscillations céphaliques des non gymnastes sont plus importantes qu'en l'absence de flux, ce qui n'est pas le cas pour les experts en gymnastique. Globalement, il en ressort donc que les réponses posturales dépendent du niveau d'expérience gymnique que ce soit durant l'activation du flux ou lors des phases de transition. Néanmoins, si les gymnastes étaient plus « stationnaires » comme le montrent les plus faibles amplitudes des oscillations de la tête, ils n'étaient pas nécessairement plus stables, comme le montrent les déplacements du CdP. En s'appuyant d'une

part sur ces résultats et sur le fait que seul le flux visuel était manipulé (et non les flux vestibulaires ou somatosensoriels) et, d'autre part, sur les propositions de Stoffregen & Bardy (2001) concernant la multimodalité mise en jeu dans le couplage perception / action, il semble raisonnable de considérer que les gymnastes exploitent mieux l'information multimodale et ses (in)congruences pour maintenir une apparente stabilité. En « gelant » les mouvements de la tête, ils reproduisent ce qu'ils font, selon Marin, Bardy & Bootsma (1999), lors de leurs pratiques gymniques, pour répondre aux exigences de leur discipline sportive (les mouvements lors de réceptions d'acrobaties sont pénalisés ce qui amène les gymnastes à minimiser autant que possible ces derniers). Plus qu'un éventuel meilleur fonctionnement des récepteurs sensoriels eux-mêmes - dont l'existence n'a pu être montré (Balzer, Stokroos, Akkermans & Kingma, 2004) - ou qu'une re-pondération de l'importance de chacune des modalités sensorielles comme le proposent Vuillerme *et al.* (2001), il semble que ce qui spécifie les gymnastes dans cette tâche est leur plus grande capacité relativement aux autres participants à détecter et exploiter la cohérence perceptivo-motrice dans une relation entre l'organisme et l'environnement particulier. Dit autrement, dans la mesure où un même flux induit des régulations différentes selon le niveau d'expertise gymnique, il apparaît que ce type de pratique sportive amène à une gestion spécifique des lois de contrôle (Bardy & Laurent, 1998).

Par ailleurs, ces résultats amènent trois remarques. Tout d'abord, ils montrent une fois encore que l'étude se basant uniquement sur les variations du CdP ne permet pas de spécifier ce qu'est réellement l'activité posturale. En effet, au regard de ce seul indice, la conclusion aurait été qu'il n'y a pas de différence entre gymnastes et non gymnastes : la compréhension des processus posturaux passe donc par l'analyse d'éléments cinétiques et cinématiques. De plus, les phases de transitions qui amènent à modifier les paramètres de la boucle perception / action génèrent une activité elle aussi largement informative pour l'observateur. Enfin, puisque pour des déplacements du CdP similaires, les déplacements de la tête peuvent être différents selon les groupes, ces résultats viennent confirmer, s'il était nécessaire, et de manière très simple qu'il n'y a pas, dans la réalité de l'activité posturale correspondance directe entre déplacement du CdP et activité des segments engagés (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999). Il peut par ailleurs être noté qu'en utilisant des indices et outils spécifiques, à savoir la Recurrence Quantification Analysis (RQA évoquée plus tôt), Schmit, Regis & Riley (2005) ont montré que la pratique intensive (de la danse relativement à la course) modifiait la dynamique spatio-temporelle des oscillations posturales. Là encore, l'analyse unique de la variabilité du CdP ne laissait apparaître aucune différence entre les danseurs et les autres participants. La question de l'effet de l'expertise gymnique sur la posture a aussi été abordée à travers le prisme de la coordination hanche / cheville. Marin, Bardy & Bootsma (1999) ont repris la méthodologie de suivi de cible (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999) présentée

précédemment et ont fait varier la surface (sur le sol ou sur une poutre de 10 cm de largeur) avec des participantes gymnastes et non gymnastes. De plus si dans la première de leurs expérimentations, la consigne était simplement de suivre la cible avec la tête, dans la seconde, elle était de maintenir une coordination en phase lors de ce suivi. Leurs résultats montrent non pas l'existence de patrons particuliers chez les gymnastes mais la présence des deux coordinations habituellement observées en phase et antiphase ainsi que le passage de l'une à l'autre lorsque la fréquence d'oscillation de la cible augmente, et que la transition est plus tardive chez les gymnastes que chez les non gymnastes. Les auteurs suggèrent alors en s'inspirant du modèle proposé par Turvey, Schmidt, Rosenbaum & Kugler (1988) d'une articulation envisagée comme un simple système de masse-ressort et de pendule inversé⁴⁷, que la pratique gymnique en augmentant la raideur musculaire des muscles antérieurs et postérieurs mis en jeu dans les mouvements de hanche et de cheville modifie les fréquences de transition. L'interaction de cette caractéristique de l'organisme avec les autres contraintes que sont la surface de support et la tâche à réaliser ferait alors émerger ce comportement spécifique des gymnastes. Cependant, comme le signalent les auteurs eux-mêmes, la gymnastique n'est pas la seule pratique sportive qui pourrait avoir pour effet d'augmenter cette raideur et sans doute qu'une comparaison entre gymnastes et pratiquants d'autres sports permettrait de lever ce doute. Cela permettrait par de confirmer (ou d'infirmer) si l'effet notable sur la régulation posturale de la gymnastique se limite (ou non) à une modification de l'équation de contrainte liée uniquement à des caractéristiques mécaniques, ou si des aspects informationnels entrent en jeu. A cette question les auteurs (Marin, Bardy & Bootsma, 1999) répondent partiellement en montrant que la réalisation de la tâche est meilleure et que la variabilité de la phase relative hanche / cheville est moins grande chez les gymnastes que chez les non gymnastes indiquant ainsi une meilleure coordination information / mouvement.

Par ailleurs, l'étude de l'effet d'une pratique motrice sur la posture pose un autre problème. En effet, que nous soyons sportif ou non, nous sommes tous des experts de la posture dans la mesure où depuis son acquisition, nous la mettons en jeu quotidiennement et avons tous largement surpassé les critères classiques lorsque l'on considère l'expertise à travers un nombre d'heures de pratique (Williams & Ericsson, 2005). Toutefois, Schmit, Regis & Riley (2005), en utilisant des outils d'analyse non linéaire (RQA) ont montré que l'absence de différence en terme de quantité de mouvement (entre des coureur(se)s et des danseur(se)s) peut s'accompagner de différences qualitatives. Qui plus est, si l'on considère que la régulation posturale émerge de l'interaction entre la tâche, l'organisme et l'environnement et que la posture n'existe que dans le cadre d'une tâche

⁴⁷ Dans ce type de système l'augmentation de la raideur du ressort (du muscle) augmente la fréquence de résonance du système. On peut par ailleurs noter que l'influence de la raideur musculaire dans la prévention du déséquilibre est évoqué dans un modèle très différent (voir chapitre 2.3) et sans rapport avec la pratique sportive par Massion (1992).

supraposturale (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999; Riccio & Stoffregen, 1990; Stoffregen & Riccio, 1988), alors, comme précédemment, mesurer uniquement de la quantité de mouvement en posture érigée maintenue pour elle-même (Asseman, Caron & Cremieux, 2004; Balter, Stokroos, Akkermans & Kingma, 2004; Vuillerme & Nougier, 2004) n'a guère de sens et ne permet pas de répondre à la question. En d'autres termes, un « bon » contrôle postural ne correspond pas nécessairement à une réduction des oscillations mais doit être défini en relation avec les contraintes (dont celles de la tâche) auxquelles il est soumis. Selon Riccio & Stoffregen (1990) et Stoffregen & Riccio (1988), une posture stable correspond plutôt à une réduction (une minimisation) des mouvements incontrôlés dans le couplage perception / action lorsque des déstabilisations viennent le perturber. Les mouvements incontrôlés témoignent alors d'une perte de stabilité qui entrave nécessairement la performance supraposturale. Néanmoins, ces idées sont difficiles à généraliser dans la mesure où la plupart des travaux cités ci-dessus appuient leurs conclusions sur des résultats expérimentaux obtenus soit en « moving room », soit en utilisant la méthodologie de suivi de cible développée par Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999). Or les premiers n'informent guère sur la coordination motrice mise en jeu et les seconds ne permettent d'envisager la posture que dans sa dimension cyclique. Cette dernière remarque pourrait d'ailleurs être étendue à l'étude de la motricité d'un point de vue dynamique, bien qu'il existe des exceptions déjà citées (Temprado, Della-Graza, Farrell & Laurent, 1997, par exemple). Pourtant, il nous arrive aussi, tant dans les activités sportives que dans la vie quotidienne, de mettre en jeu des activités posturales dans des actions discrètes, par exemple face à une déstabilisation, attendue ou non.

L'objet de ce travail réalisé au CETAPS (Gautier, Thouwarecq & Larue, 2008) était alors de montrer, que, comme l'ont mis en évidence Marin, Bardy & Bootsma (1999) pour une activité posturale cyclique, dans une activité posturale discrète mais non spécifique à un sport donné, une pratique sportive intensive amène à une modification qualitative des coordinations. Nous faisons l'hypothèse que face à un déséquilibre les gymnastes réagiraient plus rapidement et adopteraient une coordination qualitativement différente des non gymnastes. Pour ce faire, deux groupes ont été constitués : un groupe de gymnastes de niveau au moins national et un groupe de spécialistes de sports collectifs et athlétisme de niveau analogue. Les participants étaient placés sur une plateforme posturographique et équipés de cinq marqueurs placés à droite (petit orteil, cheville, genou, hanche, épaule) dont les déplacements étaient enregistrés grâce à un dispositif vidéo. Au cours de chacun des trois essais les participants devaient, en étant debout, fixer une cible visuelle, un poids représentant 7% de leur masse corporelle étant attaché dans leur dos. A la fin de cette période, le poids était relâché et les participants devaient de nouveau maintenir leur équilibre durant vingt cinq secondes (les participants ignoraient la durée de l'essai ainsi que le moment où le poids serait, ou

non, relâché). Quatre phases pouvaient alors être définies : durant la phase 1 (maintien), le participant se maintient avec le poids dans le dos, la phase 2 (déstabilisation) débute au moment où le poids est relâché et se termine lorsque le déplacement du CdP dans l'axe antéro-postérieur atteint son maximum, la phase 3 (re-stabilisation) débute à la fin de la phase 2 (!) et se termine lorsque les valeurs du CdP (dans l'axe antéro-postérieur) restaient dans deux écart-types de la distribution des valeurs obtenues dans un essai de 30 secondes réalisé sans que le poids ne soit relâché (Kluzik, Horak & Peterka, 2005), moment à partir duquel la phase 4 (stabilité) débutait.

Le premier constat réalisé est que durant l'essai de familiarisation sans déséquilibre provoqué, les différences entre gymnastes et non gymnastes concernant les déplacements du CdP ne sont pas significatives. Or, comme vu par la suite, des différences d'une autre nature émergent. Cela confirme encore que cette seule variable mesurée en posture érigée n'est sans doute pas sensible à l'ensemble des modifications fonctionnelles qui peuvent affecter la posture. L'analyse de l'évolution du CdP indique par ailleurs que la surface et la vitesse du déplacement du CdP ne dépendent pas non plus de l'expertise sportive quelle que soit la condition (poids relâché ou non). En revanche, les gymnastes mettent significativement moins de temps que les autres pour retrouver la stabilité, montrant alors leur capacité à s'adapter rapidement aux contraintes de la situation, ceci au service de la tâche supraposturale. Cette pratique semble donc développer la sensibilité de l'individu aux mouvements de son propre corps (Danion, Boyadjian & Marin, 2000). Il apparaît alors, à l'instar de ce que proposent Le Runigo, Benguigui & Bardy (2005), dans une étude concernant l'effet de l'expertise en tennis sur des tâches d'interception, que la pratique intensive, de la gymnastique dans ce cas, permet d'optimiser le couplage perception / action lors de déstabilisation posturale. L'argument utilisé précédemment est alors encore valable : cette optimisation ne venant pas d'une meilleure sensibilité des récepteurs en eux-mêmes (Balzer, Stokroos, Akkermans & Kingma, 2004), il semble plutôt que les gymnastes développent une meilleure capacité à exploiter l'information multimodale (Stoffregen & Bardy, 2001; Van Der Kooij, Jacobs, Koopman & Grootenboer, 1999). L'analyse cinématique révèle de son côté, que les mouvements angulaires sont significativement plus importants pour les gymnastes que pour les participants du groupe témoin durant les phases de déstabilisation (chevilles, genoux, hanches) et de restabilisation (chevilles et hanches). En revanche, le temps pour revenir à l'état stable est significativement plus court pour les experts gymniques que pour les autres participants, pour qui les variations angulaires sont significativement plus grandes lors de la phase de restabilisation relativement à celle de déstabilisation (alors que c'est l'inverse pour les gymnastes). Autrement dit, les gymnastes produisent des variations angulaires plus importantes mais mettent moins de temps à retrouver un état stable. Mais surtout, cette analyse montre que, en fonction des groupes, les coordinations mises en jeu sont différentes et que les

gymnastes mettent en jeu des réponses posturales spécifiques (figure 12).

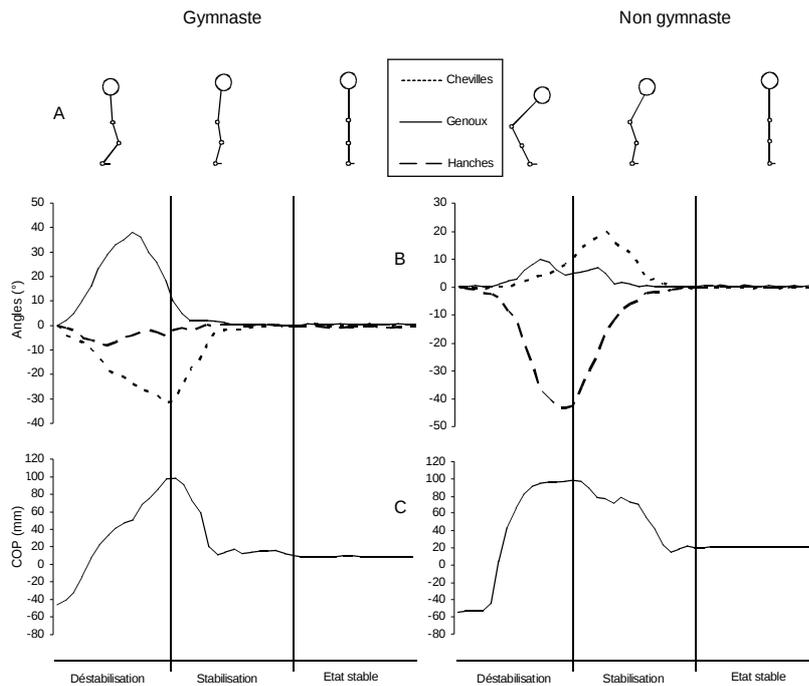


Figure 12 : Exemple de l'évolution de l'organisation posturale d'un gymnaste (à gauche) et d'un non gymnaste (à droite) lors d'un essai. A : représentation schématique de l'évolution de l'organisation segmentaire du corps ; B : valeurs angulaires de chaque articulation étudiée et C : l'évolution des positions du CdP, au cours d'un essai. Les données ont été normalisées pour faciliter la lecture des graphiques (extrait de Gautier et al., 1988),

Face au déséquilibre les non gymnastes mettent en jeu préférentiellement les hanches pour repositionner rapidement le CdP, alors que les experts en gymnastique utilisent les genoux. La coordination employée par ces derniers n'est donc pas celle des non gymnastes en plus efficace ou plus efficient mais une autre, radicalement différente. L'interaction de mêmes contraintes de tâche (fixer la cible) et d'environnement (un déséquilibre), mais différentes selon les groupes en ce qui concerne les contraintes de l'organisme fait émerger des organisations distinctes. Comme le suggèrent Marin, Bardy & Bootsma (1999), les règles de la fédération internationale de gymnastique pénalisant les mouvements de hanche pouvant apparaître à la fin des figures, les gymnastes intègrent cette contrainte de la tâche au cours de leurs (nombreux !) entraînements. En descendant le centre de gravité par la flexion des genoux, d'une part, ils réduisent l'amplitude de la rotation antéro-postérieure et donc le moment d'inertie et d'autre part, donnent à voir un mouvement dans lequel le déséquilibre est moins apparent et devrait être moins pénalisé en compétition. Par ailleurs, on peut noter que chez les non gymnastes la coordination mise en oeuvre durant la phase de stabilisation ressemble à ce que Nashner & McCollum (1985) ont nommé « stratégie verticale », en

particulier. A la lumière de cette étude il apparaît que les analyses cinétique et cinématique sont complémentaires et toutes deux nécessaires à la compréhension du contrôle postural, en particulier lorsque l'on s'intéresse à des aspects discrets liés à un déséquilibre.

De plus, les résultats semblent indiquer que si une activité cognitive entrant dans l'équation de contraintes - dans ce cas l'intention⁴⁸ du gymnaste de produire au cours de sa pratique sportive un patron particulier - modifie les coordination mises en jeu lors de pratiques spécifiques, le grand nombre de répétitions modifie aussi celles-ci lors de pratiques non spécifiques. En d'autres termes, le développement pour des activités spécifiques de nouveaux attracteurs au cours de l'apprentissage en gymnastique qui, selon Zanone & Kelso (1992b), devrait s'accompagner d'une diminution des attracteurs initiaux qu'utilisent les non gymnastes, modifie aussi le paysage de ceux utilisés dans la vie quotidienne par les gymnastes. Il est alors tentant de considérer qu'il y a eu transfert de l'activité spécifique vers l'activité non spécifique. En effet, si le terme de transfert d'apprentissage fait plutôt penser à des approches cognitivistes (utilisation d'un même programme ou extrait de programmes d'une situation à une autre) et si cette question est pour le moins sujette à débat (Schmidt, 1993, p. 180), il n'en est pas moins utilisé dans les approches dynamiques. Toutefois, dans le cadre de ces dernières, il s'agissait d'études qui traitent de transfert d'une coordination à l'autre, par exemple pour des phases relatives de 90 et -90 dans des coordinations bimanuelles (Zanone & Kelso, 1997), ou d'un effecteur à l'autre (Kelso & Zanone, 2002). Comme le développent les auteurs dans cet article (2002), le fait que le transfert d'apprentissage de coordination soit observé (entre membres supérieurs et inférieurs) montre que ce qui est appris n'est pas « membre dépendant » mais dépend d'un niveau supérieur, nerveux. Et surtout ces auteurs suggèrent que apprentissage et transfert mettent en jeu un mécanisme commun de haut niveau. Plus proche de notre étude, Lee, Swinnen & Verschueren (1995) ont montré que l'apprentissage d'une coordination non spontanée (flexion / extension des coudes à 90°) à une fréquence donnée améliore les performances pour une fréquence supérieure. De même, Swinnen *et al.* (1997), dans le même type de tâche ont montré que les participants de trois groupes indépendants (dans l'un les sujets avaient les yeux bandés, dans le deuxième ils disposaient d'un feed-back via la vision et dans le troisième ils disposaient d'un feedback augmenté sous forme de figure de Lissajous⁴⁹) amélioreraient leur performance dans chacune des trois conditions et ne sont pas nécessairement meilleurs dans la condition dans laquelle ils ont appris. Les auteurs en concluent que le patron appris dans une des trois conditions est transféré aux autres conditions lorsque les participants y sont confrontés. Toutefois, les questions

48 Appelée aussi information comportementale par Schoner & Kelso (1988).

49 Représentation (sur un oscilloscope ou écran par exemple) de deux signaux et de leur décalage. Dans cette expérimentation, la position (angulaire) du bras droit était donnée sur l'axe des abscisses et celle du bras gauche sur celui des ordonnées. La projection orthogonale des deux positions résume le décalage.

posées par ces travaux restent assez éloignées de celles envisagées dans notre étude. Une autre façon d'envisager le problème serait peut-être de considérer que la coordination qui émerge correspond, parmi celles explorées, stabilisées dans différentes tâches, à celle la plus efficace dans le cadre des couplages perception / action et régulation posturale / performance dans la tâche supraposturale. Il est toutefois évident que ces questions nécessitent des propositions théoriques plus étayées qui devraient être suivies de validations expérimentales.

Au regard des chapitres précédents, il apparaît que l'approche des systèmes complexes appliquée à la motricité, et en particulier à la régulation posturale, offre un ensemble d'arguments et faits cohérents et propose par là même un mode d'explication tout à fait convaincant. Ceci est d'autant plus vrai que son développement plus récent (tout au moins dans les domaines évoqués ici) que celui des approches cognitivistes permet aux auteurs de baser une partie de leur démonstration en s'appuyant sur les faiblesses de ces dernières. Toutefois, ne voir ici que cette seule qualité dans ces propositions serait largement réducteur face à la rigueur des argumentations, à l'élégance des démonstrations théoriques, aux nombreuses validations empiriques et aux modèles qui en découlent (ou qui les précèdent). Mais, il serait tout aussi réducteur d'ignorer un certain nombre de limites induites par ce cadre théorique.

3.5. Limites des approches complexes

Comme cela fut le cas pour les approches cognitivistes, et pour les mêmes motifs, il n'est pas question ici de développer l'ensemble des limites et critiques qui pourraient être opposées aux propositions présentées plus avant. Seul un petit nombre sera abordé dans le but de montrer qu'elles peuvent être fondées et ne pas donner l'illusion que ces approches, contrairement au cognitivisme seraient exemptes de défaut. Toutefois, il faut noter que certaines remises en cause, rarement publiées dans la littérature scientifique mais souvent évoquées et sans doute les plus « popularisées », ne sont pas toujours justifiées ou tout au moins pas toujours posées telles qu'elles devraient. Il est par exemple reproché aux approches dynamiques d'être excessivement mathématisées et les modélisations qui s'y rapportent difficilement abordables⁵⁰. Une autre critique discutable, et en fait très proche de la première, concerne la mise en oeuvre pratique, en particulier dans le domaine de l'enseignement, des connaissances issues de ces travaux. Il est vrai que les conclusions qui ressortent en matière de pédagogie ne sont finalement guère différentes de celles qui ressortaient des approches cognitivistes. Si cette critique peut paraître au premier abord de peu d'intérêt, elle n'en soulève pas moins le problème très commun dans le domaine de la psychologie et

50 Delignières (2009) donne quelques exemples de ce type de critiques. Il indique que l'abstraction mathématique est un outil puissant et que critiquer un champ théorique sur le seul argument que dans certains articles un grand nombre d'équations se succèdent est « assez misérable » (p.25)!

de la recherche en général de la mésentente qui peut exister entre des chercheurs dont le but est d'expliquer (ou de comprendre dans certains domaines) et des praticiens qui, fort légitimement, aimeraient recevoir des outils directement applicables. Les différences fondamentales entre approches cognitivistes et complexes de la motricité ne se situent pas au niveau de prescription de ce qu'il faut faire pour que, par exemple, un nouveau mouvement soit appris, mais plutôt au niveau du cadre théorique qui peut expliquer pourquoi il est appris. Comme le signale J-J Temprado dans un entretien pour une revue de vulgarisation scientifique (Temprado, 2010) « *cela [les approches dynamiques] ne remet pas en cause l'utilisation des variables d'apprentissage présentées auparavant [dans le cadre d'une conception cognitiviste], mais justifie leur utilisation dans un autre contexte théorique explicatif* » (p. 8). Toutefois, cela ne signifie pas non plus que les conclusions pédagogiques sont totalement identiques : par exemple, l'importance de variables globales (les paramètres d'ordre) serait plus grande dans une pédagogie qui serait principalement issue des approches complexes. Mais les attentes de méthodes radicalement différentes provoquées par des conceptions ontologiques fondamentalement différentes ne sont pas satisfaites tout simplement parce que ce n'est pas l'objet de ces travaux de recherche et parce que cela ne se justifie pas nécessairement. Une troisième critique, certes, là aussi discutable, émerge en reprochant aux approches complexes d'être soit a-cognitives soit une forme de néo-behaviorisme. Les causes de cette critique ont sans doute trois sources. La première est l'utilisation du terme « black-box » (Riccio & Stoffregen, 1990, p. 265 par exemple) pour exprimer le fait que l'approche va envisager le processus de couplage au sein du système sujet / environnement et non dans une représentation interne propre à l'individu. Et de fait, l'inaccessible « boîte noire » fait penser au behaviorisme méthodologique de Watson (1930). Toutefois, l'un ne peut pas être réduit à l'autre. En effet, si le behaviorisme attribuait exclusivement à l'environnement les causes du comportement (Skinner, 1979), tel n'est pas le cas dans les approches écologiques et dynamiques : comme cela fut présenté précédemment, le comportement émerge de l'interaction de contraintes qui, vues d'un observateur extérieur, sont internes et externes à l'individu. La deuxième source d'incompréhension est liée au statut de la cognition dans ces approches. Quand durant plusieurs décennies la seule vérité consistait à considérer que comprendre la motricité consistait à comprendre le traitement de l'information et la prescription, une approche dans laquelle il n'y a pas prima de la cognition peut aisément dérouter. Toutefois, ce problème n'est pas propre à la psychologie. En effet, comme le signale Kelso (1994, p. 398), « *Lorsque Schrodinger (1944) suggéra - probablement à l'horreur de beaucoup, à cette époque et aujourd'hui – que la compréhension des systèmes vivants pourrait impliquer « d'autres lois » au delà des lois connues de la physique, les concepts de patrons et d'auto-organisation dans des systèmes non équilibrés et ouverts ne furent guère entendus (ou de manière indistincte...)* »*. Et

il faut effectivement, à notre niveau, c'est-à-dire dans l'étude de la motricité, accepter, pour envisager la question d'un point de vue complexe, de remettre en cause les fondements mêmes des connaissances acquises pour aller vers d'autres approches et « d'autres lois ». Or, l'exploration de ces nouvelles questions est passée dans un premier temps encore récent par des études dans lesquelles une part importante était donnée à des aspects, apparemment et si l'on regarde de loin, purement biomécaniques comme dans les travaux de Kugler, Kelso & Turvey (1982) ou dans le domaine postural ceux de Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999). Il faut alors se plonger un peu dans un cadre théorique, pour le moins non intuitif pour qui est issu d'une culture psychologique traditionnelle, pour voir que l'importance de la cognition dans ce qui génère le comportement moteur n'est pas niée mais que son statut n'est peut être pas celui de déterminant omnipotent. Il suffit pour s'en convaincre de voir l'importance accordée au rôle de l'intention et de l'attention par les auteurs se réclamant de ces approches, dans lesquelles il n'est pas considéré que le couplage perception / action réduit le comportement moteur à une pure automaticité (Stoffregen, Hove, Schmit & Bardy, 2006). La troisième source d'incompréhension est en fait un cas particulier de la deuxième puisqu'elle concerne la représentation. Qu'elle soit imagée ou amodale, que l'on s'intéresse à son aspect fonctionnel ou à sa forme nerveuse, la représentation est la clé de voûte du cognitivisme ce qui amène des auteurs à considérer qu'agir c'est avant tout réaliser des modèles internes (Kawato, Furukawa & Suzuki, 1987). Les approches complexes remettent clairement en cause ce point de vue et ne considèrent pas que le mouvement est une simple exécution d'une action avant tout interne, ce qui amène parfois à conclure un peu vite qu'elles n'envisagent aucun rôle à la représentation, voire qu'elles nient son existence. En effet, lorsqu'il est demandé aux participants de réaliser par exemple des coordinations bimanuelles à 90° de phase relative (Kostrubiec & Zanone, 2002), sans doute se font-ils une représentation de la tâche. Néanmoins, cette représentation ne prescrira pas en soi le mouvement mais sera intégrée dans l'équation des contraintes qui fera émerger le patron moteur. L'autre ambiguïté vient peut-être aussi du fait que l'acception habituelle, depuis le bas niveau (une forme de copie interne du monde) aux formes les plus abstraites, de la représentation est envisagée comme symbolique, pouvant certes évoluer (vers des niveaux d'abstraction plus élevés), mais relativement stable et s'intercalant entre perception et action. Elle est par nature discrète et non incarnée. Au contraire, dans les approches dynamiques, la représentation est vue comme un flux continu qui se construit dans les interactions entre le sujet et l'environnement (Wagman, 2010) et la cognition ne consiste pas en passages successifs d'un état mental à un autre mais en une trajectoire dans un paysage cognitif contenant des attracteurs (Spivey, 2007) et dans lequel des bifurcations (transitions) apparaissent en fonction des interactions avec le contexte. Si les critiques selon lesquelles les approches complexes concerneraient une psychologie néo-behavioriste

et/ou a-cognitive ne paraissent pas réellement fondées, d'autres, au contraire, semblent l'être plus.

On peut tout d'abord s'interroger sur l'écologie des situations utilisées pour valider empiriquement les hypothèses issues de la réflexion théorique. En effet, les dispositifs mis en oeuvre dans des travaux paradigmatiques, tels que le « *coupled wrist pendulum system* » (Kugler & Turvey, 1987; Turvey, Rosenblum, Schmidt & Kugler, 1986), ne correspondent à aucune réalité quotidienne, professionnelle ou sportive (sauf exceptions de certains dispositifs de musculation ou activités athlétiques). De même, la procédure de suivi de cible développée par Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999) et utilisée par la suite dans différentes études met en jeu une tâche posturale qui n'existe guère que dans le laboratoire. Bien entendu, le but de ces expérimentations n'est pas de reproduire fidèlement la vie quotidienne mais bien de valider des hypothèses de recherche fondamentale, qui formeront un corpus de connaissances dont l'utilisation à des fins technologiques viendront sans doute par la suite. Toutefois, le problème de la généralisation des connaissances ainsi validées peut apparaître. Par exemple, l'expérimentation de suivi de cible, en imposant aux participants des contraintes de tâche fortes, a permis de mettre à jour la dynamique intrinsèque mise en jeu dans la posture et il semble raisonnable de considérer que dans la plupart des cas, la coordination en phase est celle que nous utilisons. Ceci étant, rien ne prouve à ce jour que, dans des tâches plus simples mais bien réelles comme fixer une cible éloignée, ce patron est exclusif. Si la tâche cognitiviste qui consiste à « rester debout sur une plate-forme posturographique » ne permet pas d'envisager des aspects qualitatifs de la posture, la tâche de suivi de cible quant à elle, ne permet pas de dire ce qui se passe dans les tâches les plus communes. De plus, dans le cadre complexe, il est posé d'emblée que la posture est au service de la tâche supraposturale (Ricchio & Stoffregen, 1990); Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999). Or, les tâches proposées consistent en général à considérer que la tâche en question est de faciliter l'ancrage visuel. Certes, le postulat de départ s'appuie sur le couplage fonctionnel entre perception et action, mais ce faisant, ces études ignorent ce qui se passe lorsque la tâche supraposturale va au-delà, comme réaliser un acte moteur peu ample mais avec une grande exigence de précision ou lorsque des forces autres sont ajoutées comme lorsque l'on visse ou encore tout simplement lorsque l'on prend appui (léger ou non) sur un objet. Cependant, il serait faux de considérer cette critique comme absolue puisque certaines études (certes peu) s'intéressent à des tâches plus ancrées dans la réalité de nos actions comme dans le domaine sportif (Temprado, Della-Grasta, Farell & Laurent, 1997; Bardy & Laurent, 1998; Balasubramaniam, Riley & Turvey, 2000) ou comme dans le programme développé par Thomas Stoffregen autour d'une réinterprétation des causes des nausées dues aux transports ou aux jeux vidéo (Villard, Flanagan, Albanese & Stoffregen, 2008; Stoffregen, Chen,

Yu & Villard, 2009; Stoffregen, Faugloire, Yoshida & Flanagan, 2008).

Par ailleurs, une autre limite peut être évoquée, à savoir celle d'un manque de complétude du modèle pour le psychologue. A l'image du transfert pour lesquels les processus sous-jacents du point de vue des systèmes complexes restent en grande partie obscurs, des points importants tels que (pour ne citer que ceux-là) l'apprentissage incident (Saltzman & Atkinson, 1954) ou les processus vicariants (Ohlmann, 1990b) ne sont guère abordés. Ces faits facilement observables ne trouvent guère d'explications empiriquement validées dans le champ des systèmes complexes appliqués à la motricité. Des pistes peuvent bien sûr être envisagées. Dans les processus vicariants, des contraintes analogues dans des contextes différents devraient faire émerger des types de comportements analogues. En ce qui concerne l'apprentissage incident, il peut aussi par exemple être considéré que des modifications liées à l'expérience interviennent dans la dynamique à un niveau supérieur qui engendrera alors de nouvelles formes de contraintes qui auront un effet au niveau comportemental. Toutefois, si ces propositions paraissent simples et cohérentes, il semble pour le moins malaisé de montrer leur validité.

Le manque de complétude tient aussi aux aspects développementaux. Dans ce dernier cas, le problème soulevé n'est pas lié à un manque d'observations empiriques (voir Jouen & Molina, 2007) mais plutôt au cadre conceptuel lui-même. En effet, si les approches dynamiques proposent un ensemble cohérent, étayé et convaincant, il n'en va pas de même pour les approches écologiques et des points de vue contradictoires entre les deux poignent. En effet, l'application des idées d'attracteur, de paysage, de transition, ou de l'utilité de la variabilité issues de la dynamique a ouvert des pistes fort élégantes dans l'étude du développement en général et du développement moteur en particulier. S'il n'est pas question de stade, il est en revanche question de chemins développementaux, organisés par une découverte, jalonnée de transition, des attracteurs qui permettent l'action orientée (Newell, Liu & Mayer-Kress, 2003) et les déterminismes du développement moteur ne sont ni dans le gène, ni dans l'environnement, ni exclusivement dans le cerveau : cognition et action participent d'une même dynamique globale (Thelen, 1995). De ce point de vue, la place de l'apprentissage avec un rôle important de la répétition, dans le développement de l'enfant, est prépondérante. Des observations empiriques telles que celles de Thelen (1985) montrent que l'on retrouve par exemple dans le pédalage chez le jeune enfant les trois étapes de l'apprentissage moteur décrites par Bernstein (gel, libération, exploitation des Degrés de Liberté). Les modifications du corps liées à la croissance, vont avoir des conséquences sur les propriétés mécaniques des systèmes masse-ressort (Turvey, Schmidt, Rosenbaum & Kugler, 1988) qui composent le système musculo-squelettique, mais aussi sur les propriétés fonctionnelles (comme le

maintien de la tête chez le jeune enfant lors de la posture assise) qui entrent dans l'équation permettant l'émergence de nouveaux gestes comme celui d'atteinte par exemple (Thelen & Spencer, 1998). Et c'est en s'appuyant sur ces derniers, que se construiront des catégories d'action. Le point de vue dynamique a aussi amené à ré-interpréter des données classiques telles que l'erreur A non B⁵¹ attribuée non plus à des causes purement cognitives liées à la représentation ou à la mémoire mais à l'interaction entre l'action de l'expérimentateur, la place de l'objet et le souvenir qui en reste, ce qui semble confirmé par les modifications du geste d'atteinte lorsque l'enfant est déplacé. Néanmoins, il apparaît que malgré des propositions riches et prometteuses, l'approche dynamique du développement ne semble pas s'être imposée dans le monde des psychologues développementalistes et semble pouvoir être décrite comme « *une approche révolutionnaire ayant manqué son coup d'état* » (Jouen & Molina, 2007, p. 81). Du point de vue écologique, la question du développement a aussi été explorée en particulier par Eléonore Gibson (1969). Tout d'abord, il faut noter que là non plus et contrairement aux approches classiques piagésiennes, il n'est pas question de stades ni même de grandes étapes successives (Savelsbergh, van der Kamp & Rosengren, 2006). L'enfant serait d'emblée génétiquement pré-cablé pour percevoir les affordances et mettre en jeu le couplage perception/action qui évoluent avec l'expérience. Effectivement, différentes études semblent indiquer que ces capacités sont bien plus précoces que ce qui était envisagé dans le passé confirmant en partie la proposition du pré-cablage. On peut citer pour exemple, les observations de Butterworth & Hopkins (1988) sur la coordination main / bouche chez le nouveau-né, celles de Gibson *et al.* (1987) sur l'évitement des surfaces qui ne permettent pas la marche chez les néo-marcheurs ou encore celles de Bertenthal & Compos (1990) quant à l'effet de la marche à quatre pattes sur la sensibilité. Les évolutions dépendraient alors de celles du système nerveux et des synergies musculaires. Par exemple, Grenier (1981) montre qu'en palliant les problèmes de chute de la tête du nouveau-né, il est possible de « libérer » la motricité, l'enfant étant alors directement disponible pour des activités d'atteinte par exemple⁵². Cette précocité de la capacité à orienter et contrôler le mouvement et à agir sur le monde physique relativement aux connaissances qu'a l'enfant de ce monde a été mise en relation et justifiée par l'hypothèse de la dissociation entre deux systèmes neuroanatomiquement différenciés. Selon Goodale & Milner (1992), il existe deux voies visuelles cortico-corticales (haute et basse), l'une dédiée au guidage visuel de l'action et l'autre au

51 L'erreur A non B caractéristique du stade IV du stade sensori-moteur dans le modèle piagésien apparaît vers 8 – 10 mois environ. L'adulte cache, sous les yeux de l'enfant, plusieurs fois de suite, un objet intéressant pour ce dernier (un jouet, un « doudou ») sous un couvercle ou un tissu que l'enfant soulève pour le récupérer. Suite à ces répétitions, alors que l'adulte cache toujours sous les yeux de l'enfant l'objet sous un autre couvercle, l'enfant continue à chercher là où il l'avait récupéré précédemment.

52 Visionner la vidéo qui correspond à ces propositions, n'est sans doute pas la plus scientifique des démarches mais offre un éclairage réellement convaincant. Un court extrait est disponible à l'adresse qui suit sachant qu'elle est probablement éphémère (http://www.youtube.com/watch?v=VwWT08uT1_E).

traitement cognitif. De ce fait, si la perception dans le cadre du couplage perception / action et la perception dans un système de reconnaissance et représentation sont deux domaines distincts (von Hofsten *et al.*, 1998) alors les décalages développementaux semblent pouvoir être expliqués. Néanmoins, ces propositions posent un certain nombre de problèmes. Tout d'abord, la dissociation neuroanatomique entre les deux voies ne s'accompagne pas nécessairement d'une distinction fonctionnelle. En effet, la voie dorsale est mise en jeu que le sujet soit en train d'agir ou qu'il voie l'action réalisée par autrui (Craighero, Fadiga, Rizzolatti & Umiltà, 1999), ce qui tendrait à montrer que agir et percevoir sont la même activité (Decety & Jeannerod, 1995). Par ailleurs, l'hypothèse du pré-cablage, si l'on se réfère au cadre des systèmes complexes, pose aussi problème. En effet, elle suppose un déterminisme génétique fort peu compatible avec l'idée d'influence de l'ensemble du système sur chacun des éléments qui le compose. De ce point de vue, les propositions de Edelman (1993) puis Hadders-Algra (2001a) par exemple semblent plus convaincantes. Le décalage entre approches dynamiques et approches écologiques quant à la place de l'épigenèse et les problèmes posés par les secondes ne militent pas en faveur de l'ensemble. Et il semble difficile de s'affranchir soudainement de l'un des deux points de vue lorsque des divergences théoriques apparaissent, comme c'est le cas pour la question du développement.

Une autre limite des approches complexes dans l'étude de la motricité et de la posture tient à la faiblesse supposée de leur puissance explicative. Beek, Peper & Stegeman (1995) rapportent à ce sujet les propos de Rosenbaum⁵³ (1991, p. 372) au sujet du modèle HKB (Haken, Kelso & Bunz, 1985) : « *la synergétique n'est pas une théorie des causes⁵⁴ de la non-linéarité. Ce n'est pas une théorie qui tente de dire à l'avance quel type de non linéarité manifestera dans quel système ou quels seront les paramètres d'ordre et paramètres de contrôle. L'objet théorique est purement descriptif et, dans ce sens, modeste. D'autre part, la synergétique peut et fait des prédictions concernant des systèmes particuliers soumis aux variations de paramètres de contrôle. Par exemple, les transitions de phase et les fluctuations critiques dans les oscillations bimanuelles sont hautement répliquables* »*. Toutefois, toujours selon Beek, Peper & Stegeman (1995), « *l'accusation* » (p. 593) de faiblesse explicative et de modestie est discutable. Tout d'abord, ils rappellent que face à un nombre trop élevé d'éléments au niveau microscopique, les approches complexes proposent une description à haut niveau d'abstraction avec des échelles temporelles qui peuvent être différentes selon les niveaux du système, ce qui en soi est une forme d'explication et qu'il ne s'agit pas de démarche « purement descriptive ». Ils soulignent ensuite que des phénomènes physiques apparemment simples comme le passage d'un écoulement laminaire à un écoulement

53 Rosenbaum, D.A., 1991. Human motor control. New York Academic Press.

54 Beek précise que l'italique (soulignée ici) est dans le texte de Rosenbaum (1991).

turbulent d'un fluide ne sont pas nécessairement mieux expliqués. Mais les limites d'une approche réductionniste (qui consisterait à essayer dans ce cas à trouver la cause dans chacune des molécules du fluide) ont mené à l'abandonner au profit d'autres qui cherchent à identifier des principes généraux à des niveaux d'abstraction plus élevés. De plus, ils reprennent les propos de Rosenbaum (1991) cités plus avant quant à la possible explication des transitions de phase par des limites dans le traitement de l'information et font remarquer que les causes de celles-ci ne sont guère non plus déterminées puisqu'on ignore si elles concernent le « canal perceptif », « moteur » ou la supposée programmation en elle-même. Ils indiquent aussi que le concept de représentation ne suppose pas nécessairement l'existence d'un programme moteur. En effet, tout dépend de la définition que l'on en donne et si l'on considère l'activation d'une population de neurones comme une représentation à un niveau d'abstraction élevé du système qui n'induit pas de prescription alors il n'y a pas d'incompatibilité avec l'approche complexe. Enfin, ils terminent leur propos sur cette question en signalant que l'approche dynamique permet d'expliquer les phénomènes de transition à différentes échelles (coordination inter-segmentaire comme coordination interpersonnelle par exemple), ce qui n'est pas le cas du programme moteur.

On peut tout de même noter qu'une partie des réponses aux critiques quant à la puissance explicative, proposées ici par Beek, Peper & Stegeman (1995), s'appuient sur des postulats épistémologiques spécifiques. Cette question dépasse bien sûr largement le cadre strict de l'étude de la motricité ou de la posture mais concerne l'approche complexe en général. En effet, lorsqu'il est question d'émergence synchronique, comme par exemple lorsqu'en plaçant une loupe à bonne distance, les contours de la scène émergent en une scène signifiante, tout le monde est à peu près d'accord. Les lois de l'optique classique permettent d'expliquer le phénomène. Avec les outils nécessaires, si les conditions initiales sont connues, l'application des lois en question permet la prédiction. En revanche, lorsqu'il est question d'émergence diachronique, c'est-à-dire dans des systèmes qui évoluent de manière difficilement prévisible (sous l'effet d'un paramètre de contrôle par exemple), les divergences apparaissent. En effet, dans ce dernier cas, à partir des lois et des conditions initiales, il n'est souvent pas possible de prédire par exemple quand le système transitera et il n'y a guère d'autre possibilité d'observer ou de simuler pour le savoir. Néanmoins, la simulation suppose que l'on puisse programmer le comportement des éléments individuels qui composent le système ainsi que les interactions. A supposer que cela soit possible, on pourra observer le moment de la transition (réelle ou simulée) mais non nécessairement l'expliquer en tant que telle en ce sens qu'il ne sera pas possible de la prédire. En revanche, le fait que le système bifurquera peut être prédit, ce qui est une forme d'explication, même si celle-ci n'est pas nomologique. En d'autres termes, lorsque l'on accepte d'aborder le monde en terme de complexité, sans doute est-il nécessaire

d'accepter aussi une autre forme d'explication à des niveaux d'abstraction différents. Les approches complexes ne permettent pas de prédire avec la même précision que celle proposée par le modèle cognitiviste lorsqu'il s'agit d'appliquer la loi log binaire aux temps de réaction. Inversement, à travers une démarche analytique et réductionniste, le cognitivisme ne donne pas d'explication satisfaisante des fluctuations critiques ou transitions dans la coordination posturale. Cette limite évoquée concernant le cognitivisme mérite là aussi d'être envisagée puisqu'il existe tout de même en la matière des interprétations qui supporteraient les théories du traitement de l'information. Rosenbaum (1991)⁵⁵ propose par exemple que « *comme la flexion-extension des mouvements est plus dure à programmer qu'une extension simultanée puis une flexion simultanée, il faut plus de temps pour initier le premier mouvement que le second. Lorsque le rythme des cycles augmente, un seuil est atteint dans le processus de traitement de l'information pour lequel il n'y a pas suffisamment de temps pour initier le mouvement de flexion-extension ce qui cause une transition vers un mode dans lequel les deux doigts sont fléchis et étendus simultanément* »* (Beek, Peper & Stegeman, 1995, p. 595). Comme le reconnaissent Bardy, Oullier, Bootsma & Stoffregen (2002, p. 511) dans un article qui traite des transitions posturales, une partie de leurs résultats pourrait être interprétée en terme de programmes moteurs (les transitions pourraient être le fruit de la mise en jeu de différents programmes⁵⁶). Ces auteurs expliquent, il est vrai, par la suite, que l'approche cognitiviste n'explique pas pourquoi ces changements de programme auraient lieu. Mais ce faisant, ils montrent quand même que l'interprétation du résultat dépend grandement du présupposé théorique de départ. De plus, ces mêmes auteurs insistent (deux fois sur la même page) sur le fait que leurs conclusions s'appuient sur des données obtenues à partir d'une méthodologie spécifique, ce qui sous-entend qu'avec une autre méthodologie d'autres résultats auraient été acquis et auraient alors mené à d'autres conclusions. Comme cela fut évoqué plus tôt, la méthodologie déployée dépend d'une épistémologie et d'une ontologie dans laquelle s'engage (volontairement ou non) le chercheur. Pour ne citer que cet exemple, dans les travaux réalisés sous ma direction concernant un même objet général, l'ATR, les questions posées, les méthodologies utilisées et les mesures réalisées lorsque le cadre théorique était cognitiviste (Croix, Chollet & Thouvarecq, 2010; Croix, Lejeune, Anderson & Thouvarecq, 2010) puis complexe (Gautier, Marin, Leroy & Thouvarecq, 2009; Gautier, Thouvarecq & Chollet, 2007) étaient radicalement différentes⁵⁷. Toutefois, contrairement à ce qui arrive parfois avec les tenants du cognitivisme, on ne peut guère soupçonner,

55 Voir note 53 pour la référence.

56 Plus précisément les auteurs parlent de « plan d'action ».

57 Cette affirmation, concernant l'article Gautier, Thouvarecq & Chollet (2007), est en partie discutable puisque si les questions sont clairement orientées « approches écologiques », la méthodologie déployée et par conséquent les variables impliquées sont encore fortement inspirées de celles qui le sont dans les approches cognitivistes, ce qui témoigne sans doute d'un changement paradigmatique qui était en cours.

au regard du contenu des publications, tout au moins celles des auteurs de référence dans le domaine, que les chercheurs qui se situent dans le courant des systèmes complexes et qui traitent de contrôle moteur ou de posture ignorent leur engagement. Ce qui ne signifie pas non plus un aveuglement de leur part. Les critiques proposées par Michaels & Beek (1995), en particulier au sujet de la réfutabilité (au sens popérien) dans les approches écologiques en sont un exemple. Mais cet engagement sur lequel tient tout l'édifice de leur réflexion n'en est pas moins qu'une hypothèse, certes forte, étayée, et très convaincante mais ne peut, pas plus qu'une autre, prétendre au statut de Vérité. En ce sens, les deux approches se retrouvent dos à dos.

4. Réconcilier les approches

Disposer de deux cadres théoriques pour l'étude de la motricité et de la posture devrait être une source de richesse ne serait-ce qu'au travers des échanges que cette opposition pourraient susciter parmi les chercheurs. Toutefois, on ne peut que constater qu'il n'en va pas exactement ainsi. En effet, les débats consistent parfois plus en une affirmation de la supériorité du paradigme défendu - et accessoirement en une critique de l'autre - qu'en une recherche de points communs qui pourraient être la base d'un progrès collectif. Qui plus est l'état de fait ne semble guère nouveau, ni évoluer comme l'illustrent deux productions, publiées à 15 ans d'intervalle. A savoir, en 1988, le N° 50 de la collection *Advances in Psychology* intitulé « *Complex Movement Behaviour : The Motor-action controversy* » (Meijer & Roth, 1988) et, en 2003, un échange entre des représentants des approches cognitiviste et dynamique (Richard A. Schmidt et Karl M. Newell, respectivement) dans un numéro (partiellement) thématique de la revue *Research Quarterly for Exercise and Sport* (N°74, volume 4) et dans lesquelles chacun semble camper sur ses positions. Au final, il semble que cette opposition a, dans un premier temps, permis l'émergence d'une alternative au cognitivisme et sert désormais (parfois) plus, en réponse aux critiques, à affirmer chacun des cadres théoriques. Ceci dit, cette critique est tout de même riche en soi puisqu'elle a aussi amené les représentants de chaque point de vue, pour y répondre, à développer des travaux empiriques en la matière. Toutefois, considérer que les deux paradigmes ont eu au cours des quarante dernières années un statut scientifique identique, au sens socialement reconnu et admis, serait en grande partie inexact.

En 1992, Abernethy & Sparrow⁵⁸ ont proposé une analyse quantitative des citations dans le « *Journal of Motor Behavior* » concernant d'une part l'approche cognitiviste (« *movement systems* » ainsi que sa devancière, la théorie de Adams, 1971) et, d'autre part, l'approche dynamique au sens large (« *action systems* ») sur une période s'étalant de 1975 à 1989. Si leur comptabilité souffre un

58 La date est importante car en 18 ans les choses ont nécessairement évolué. Cependant tout porte à croire, sans pour autant pouvoir le quantifier, que la situation a évolué dans la direction que Abernethy & Sparrow (1992) prévoyaient.

peu de création de sous-catégories (une distinction entre « *schéma / motor programming theory* » et « *impulse-variability theory* ») dont la justification n'est pas évidente, il en ressort quand même des conclusions assez claires. Les citations concernant les approches cognitivistes sont nombreuses pour le début de la période avec un pic entre 1980 et 1984 suivi d'une baisse sans pour autant disparaître : Schmidt reste l'auteur le plus cité, même pour la période 1985-1989, ce qui indique, selon les auteurs, l'existence d'une « *poche de résistance* »* (p. 30). Il y a par ailleurs, une progression constante à partir de 1978 des citations liées aux approches dynamiques. Les auteurs notent aussi la publication en 1986 d'un numéro spécial « *perception-action* » dans une revue non spécialisée dans le contrôle moteur (*Acta Psychologica*), de nombreux articles qui traitent d'approches écologiques et dynamiques dans le *Journal of Experimental Psychology* ainsi que la création en 1989 d'un journal spécifique (*Ecological Psychology*), qui sont des indicateurs supplémentaires d'une crise de paradigme (au sens Kuhnien du terme). De plus, le fait que les contradictions ne concernent pas des divergences d'interprétations au sein d'un cadre épistémologique partagé mais révèlent plutôt de « *profondes différences conceptuelles et philosophiques* »* (Abernethy & Sparrow, 1992, p. 30) en est aussi une preuve. La résolution de cette crise ne peut guère passer que par deux possibilités.

La première possibilité serait une réconciliation entre les deux paradigmes autour d'un modèle hybride et la seconde verrait se dérouler une période plus ou moins longue de débats et de contradictions qui se terminerait par la domination d'un des deux ou l'émergence d'un nouveau. La réconciliation pourrait se faire en considérant que les deux approches traitent en fait de niveaux différents d'un même processus. Dans ce cas, il faudrait considérer que l'approche dynamique explique les activités automatiques dans lesquelles ni (ou peu de) planification, ou contrôle cognitif ne sont nécessaires. L'approche cognitive permettrait alors d'expliquer l'action volontaire, en supervisant éventuellement des processus dynamiques sous-jacents. Abernethy & Sparrow (1992) invoquent alors un certain nombre de faits expérimentaux qui pourraient corroborer cette proposition comme le contrôle sous-cortical mais sous supervision corticale de la marche automatique. Ils indiquent même que dans ce type de modèle hybride, le cervelet par sa position anatomique et ses rôles fonctionnels particuliers serait de première importance. Ils rappellent d'ailleurs que ce type d'hybridation ne serait pas une première⁵⁹. A un niveau différent, Schmidt (2003) propose quant à lui une révision de la théorie du schéma (sans toutefois préciser s'il intégrerait les concepts de la dynamique) en vue de la création d'un modèle qui y intégrerait un maximum de résultats empiriques et qui « *ne serait contredit par aucun* »* (p. 373). On retrouve aussi ces tentatives d'hybridations dans les propositions de « mêler » affordances et représentation

59 Ils évoquent comme exemple l'intégration dans l'attention des systèmes top-down et bottom-up sous contrôle du superviseur central considérés initialement comme contradictoires. Par ailleurs, Varela, Thompson & Rosch (1993) évoquent aussi cette question sans la développer (p. 152).

comme l'a fait Norman (voir chapitre 3.2.) ou encore d'ajouter des processus de calibration dans le guidage visuel de l'action proposé par Gibson et ses successeurs (Fajen, 2005). Toutefois, Abernethy & Sparrow (1992) ne paraissent pas convaincus eux-mêmes par les arguments qu'ils avancent et considèrent au contraire qu'une crise paradigmatique est en cours. Il semble bien qu'il ne puisse pas en être autrement dans la mesure où, d'une part, les deux paradigmes sont en compétition pour obtenir la plus grande reconnaissance et, d'autre part, certaines contradictions ne peuvent être levées. Il s'agit par exemple, comme déjà évoqué, de la place de la représentation. *« Les arguments contre la métaphore de la computation de symbole n'impliquent pas nécessairement la mémoire ou la représentation pour l'action mais remettent plutôt en cause une forme particulière de représentation, la représentation motrice symbolique »** (Newell, 2003, p. 385). Or, comme vu dans le chapitre 2.2. de ce document, cette représentation symbolique à partir de laquelle sera prescrite l'action est la base même du modèle cognitiviste de la motricité. Il apparaît donc que nous sommes et resterons encore pour un moment dans une période durant laquelle, pour reprendre l'expression de Newell (2003) *« the two paradigms have agreed to disagree »** (p. 385). Pour lui, l'époque de crise serait donc terminée pour céder la place à une autre, de science normale, dans laquelle les deux paradigmes cohabitent. Toutefois, si cette description semble assez juste, cela ne signifie pas que les « deux camps » renoncent à avoir raison. Mais sans doute que l'approfondissement des travaux et les limites qu'ils mettront en lumière dans chacune des perspectives⁶⁰ amèneront la société des scientifiques, à un moment donné, à choisir l'un des deux; ce qui n'est pas parfaitement la description d'une période de « science normale ».

Cependant, puisqu'à ce jour, vouloir réconcilier les deux perspectives est une impasse théorique, réaliser des travaux de recherche, a fortiori lorsqu'on prétend les diriger, portant sur la motricité en général ou sur la posture nécessite tout d'abord de déterminer dans quelle approche ils s'inscrivent. Il n'y a alors guère plus de deux solutions en la matière. La première consiste à choisir, selon les objets d'étude, les situations, les collaborations ou pour tout autre motif, parfois l'un des paradigmes, parfois l'autre. Il suffit alors dans chacun des cas, et puisque les limites en sont a priori bien connues, de savoir rester dans le strict cadre que l'on se fixe. Toutefois, cette approche pose au moins deux problèmes⁶¹. Le premier est qu'il serait difficile (mais pas impossible) de donner une cohérence à un ensemble de recherches qui passeraient d'une perspective à l'autre. Mais surtout le second, plus important si l'on considère que faire de la recherche c'est avant tout donner du sens, est celui de la conviction du chercheur de l'intérêt du paradigme dans lequel il s'engage. Il est certes

60 Mais aussi peut être la capacité de chacun des paradigmes à répondre à la pression sociale qui exige que la science propose des versants technologiques efficaces.

61 Un troisième problème (qui peut sembler trivial mais ne l'est sans doute pas au regard de l'évolution des tâches des enseignants-chercheurs de l'Université) est celui du temps qu'il faut investir pour se tenir au courant, autant que faire se peut, des grandes évolutions qui apparaissent dans la littérature propre à chacune des perspectives.

possible de s'appuyer sur une approche qui ne convainc pas totalement en se disant que c'est une étape nécessaire et que les travaux réalisés permettront (à leur mesure) de participer à la levée des limites ou au contraire à les éclairer encore un peu plus. De plus, comme cela a déjà été relevé, les questions posées n'étant pas exactement les mêmes et les méthodologies qui en découlent étant alors différentes, il est largement possible de développer des travaux dans chacun des paradigmes dans des champs pour lesquels la cohérence des théories résiste bien aux faits. Ce choix, à condition qu'il soit conscient, peut alors être une forme de recul face à un positivisme parfois sous-jacent dans les sciences cognitives. L'autre solution consiste à s'engager ontologiquement. Comme cela a été évoqué en introduction de ce document, cet engagement s'appuie sur des croyances ou sur un pari quant à la « nature des choses ». En d'autres termes, et dans le champ réduit de l'étude de la motricité, il s'agit de faire valoir ses croyances en la matière ou de faire un pari quant aux hypothèses cognitivistes ou complexes. Un pari est par nature irrationnel et met nécessairement en jeu une grande part de subjectivité. Cependant, quelques arguments, à défaut de déterminer le choix réalisé, y participent.

Si les deux approches montrent des limites, elles ne sont pas exactement de même nature. Celles qui s'appliquent à l'approche cognitiviste concernent principalement une contradiction entre ce que suppose la théorie et les résultats observés, ce qui tend à remettre en cause la théorie elle-même. Et si, pour répondre aux faits empiriques, elle est amputée de postulats tels que la computation de symboles ou le *prima* de la représentation, ou encore de la prescription et des stratégies dans le cas de la motricité et de la posture, alors l'hypothèse cognitiviste ne perd pas de son sens mais n'existe tout simplement plus. Cela n'empêche pas de continuer à accumuler des résultats dans un cadre théorique que l'on sait largement remis en cause tout simplement en considérant qu'à ce jour c'est le moins mauvais. Inversement, les critiques qui s'appliquent aux approches complexes concernent plutôt l'absence de réponse de ces modèles à certaines questions ou l'incapacité conceptuelle et technique à ce jour de les aborder. Le mouvement discret signifiant et quotidien, l'apprentissage implicite ou encore certains aspects du développement en sont des exemples (voir ch 3.5.) quand ce ne sont pas des pans entiers qui sont ignorés comme la neuropsychologie. Par ailleurs, et contrairement à ce qui se passe avec le cognitivisme, le niveau et la précision de l'explication dans cette perspective sont bien loin de permettre des applications qui vont au-delà de généralités. On peut par exemple citer le lien entre l'activité corticale et le mouvement. Si des travaux ont été publiés dans le domaine (Kelso, 1998, pour ne citer que celui publié dans *Nature*), ils restent néanmoins très exploratoires. On est loin des interventions chirurgicales dans les noyaux de la base pour des patients atteints de la maladie de Parkinson (Guridi *et al.*, 2000). Il s'agit certes dans ce cas de neurologie mais le modèle sous-jacent est un

modèle cognitiviste du traitement de l'information, comme le prouvent, entre autres, les tests des fonctions exécutives utilisés pour évaluer les effets de ces opérations (Jahanshahi *et al.*, 2000). Toutefois, si l'on ne peut que constater ces manques, la preuve qu'il est impossible d'aborder ces questions à travers les systèmes complexes n'existe pas (tout au moins à ma connaissance), pas plus que des résultats qui indiqueraient que l'hypothèse théorique en elle-même est invalide.

Il ressort globalement que le cadre cognitiviste bénéficie d'une grande notoriété dans la société des chercheurs (et pas seulement dans celle-ci), de l'attachement au paradigme dans lequel la plupart ont été formés, du poids de disciplines qui utilisent ces modèles (robotique, Intelligence Artificielle, neurosciences, médecine, etc.), et d'un certain nombre de résultats technologiques indéniables - mais aussi simplement de l'inertie de l'évolution des connaissances -. Toutefois, et en dépit de toutes ces forces, l'hypothèse théorique en elle-même est remise en cause et le projet, selon Varela (1988) se construit «*sur des gageures conceptuelles audacieuses, un peu comme si l'on voulait envoyer un homme sur la lune sans savoir où elle se trouve*» (p. 23). Dans l'autre cas, une hypothèse théorique alternative, développée et largement étayée dans d'autres disciplines que la psychologie ou les neurosciences, permet de dépasser les contradictions internes au cognitivisme. Elle souffre certes d'incomplétude, nécessite encore de nombreuses validations expérimentales, mais elle propose des perspectives qui tant qu'elles n'ont pas été invalidées sont fort convaincantes. En termes plus allégoriques, et quelques peu réducteurs, le pari consiste à choisir entre (i) raffiner une construction déjà gigantesque et utile mais dont il est connu que les fondations sont fragiles et s'écroulent par endroits et (ii) participer (à une très modeste mesure) à l'édification d'un nouvel édifice dont les fondations, dans l'état actuel des choses, paraissent très solides, mais dont la taille est pour le moment limitée, dont rien ne garantit que les moyens pour le faire grandir existeront, ni qu'il sera socialement utile un jour.

5. Perspectives

Les propos tenus dans les quatre chapitres qui précèdent avaient pour but, entre autres, de faire un point sur l'alternative théorique qui existe actuellement dans l'étude de la posture et plus généralement de la motricité, et par là même, de montrer sur quelles bases pouvaient se construire de futurs travaux. Tant le contenu que la forme de ce qui précède sont nécessairement porteurs de subjectivité et ne laissent certainement guère de doutes sur mes réponses quant à savoir s'il faut ou non choisir une des deux perspectives développées et si oui vers laquelle des deux je serais plus enclin à me diriger. Il semble assez logique, pour déterminer quels pourraient être les travaux à venir, de repartir des limites évoquées ci-dessus. L'ambition n'est alors pas de toutes les aborder ni même de vouloir intégralement lever celles qui seront choisies mais de participer, autant que faire

ce peut, à cette démarche. Pour rester dans une conception complexe des choses, deux pistes de travail émergent de l'interaction de différents éléments que sont (i) les questions posées par les limites du champ théorique, (ii) mes intérêts personnels, (iii) ce qui est ne serait-ce qu'envisageable en terme techniques et de collaborations et enfin (iv) les contraintes qui pèsent sur l'exercice de l'activité de recherche (temps, financements, projet de laboratoire etc.). A des niveaux de réflexion et d'avancement différents, la première piste concerne la dialectique stochasticité / déterminisme au sens large dans la régulation posturale et la deuxième concerne la question du rapport posture / tâche supraposturale en relation avec la cognition.

Le premier projet s'appuie sur les propositions de Riley, Balasubramaniam & Turvey (1999) quant à l'usage de la Recurrence Quantification Analysis (RQA) dans l'étude de la posture. Ils partent du fait que le signal issu des déplacements du CdP est typiquement non stationnaire, rendant la plupart des analyses se basant sur des transformées de Fourier inadaptées, et considèrent qu'il est fondamental de quantifier les caractéristiques déterminées et stochastiques de ce type de données posturales. Pour ce faire, ils ré-exploitent des données déjà publiées⁶² dans un article traitant de l'influence de la structure du flux optique sur les déplacements du CdP en utilisant, cette fois, la RQA. Le principe de cette analyse est de prendre ce signal et des copies décalées dans le temps de celui-ci pour reconstruire un signal dans l'espace des phases. Il s'agit ensuite de déterminer la proximité (le voisinage) des points dans cet espace, dans le temps. Pour un point donné, on détermine le nombre de points situés dans une sphère de rayon fixé, et ainsi de suite pour les points suivants, ce qui peut être représenté par un graphique des récurrences (figure 13).

62 Riley, M.A., Balasubramaniam, R., Mitra, S., Turvey, M.T. (1998) Visual influences on center of pressure dynamics in upright posture. *Ecological Psychology*, 10, 65-92.

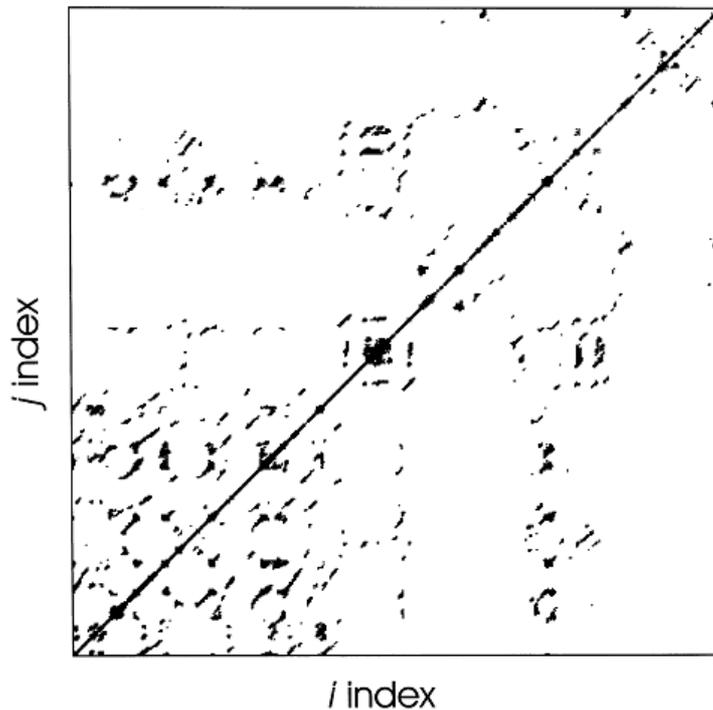


Figure 13 : Représentation graphique des récurrences des déplacements du CdP pour un essai de 30 secondes (fréquence d'acquisition 100 Hz). Chacun des 3000 points apparaît sur l'axe des abscisses (i index) et l'axe des ordonnées (j index). Les points noirs à l'intérieur de la figure représentent les points récurrents (voisins dans l'espace des phases). La diagonale correspond à la comparaison d'un point avec lui-même (figure en miroir de part et d'autre de cette diagonale). Des lignes noires parallèles à la diagonale indiquent la répétition de chaînes de données, témoin de déterminisme dans le signal (extrait de Riley, Balasubramaniam & Turvey, 1999).

Par exemple, un bruit blanc (sans structure dynamique) donnerait une distribution de ces voisinages uniforme. Trois indices semblent tout particulièrement intéressants. Tout d'abord le pourcentage de récurrence (%REC) qui est le nombre de points récurrents sur le nombre de récurrences potentielles (multiplié par cent). Un % REC égal à cent correspondrait à la répétition du même point soit un signal plat. Le deuxième indice informatif est le pourcentage de déterminisme (%DET) qui indique le degré avec lequel des points récurrents forment des chaînes répétées de données. Ces dernières sont représentées par des lignes dans le graphique des récurrences. Par exemple, un signal sinusoïdal, totalement prédictible aurait un %DET de 100. Enfin, le troisième indice (TREND) indique la dérive du signal. Un TREND non nul (négatif le plus souvent) indique un signal non stationnaire. Dans leur étude, Riley, Balasubramaniam & Turvey (1999) ont demandé à des sujets placés debout de regarder une grille en 3 D composée de barres verticales (3 rangées de 9) placée devant eux ou de côté (des conditions yeux fermés ont été ajoutées). Leurs résultats après

application de la RQA sur les signaux relevés (déplacement antéro-postérieur du CdP) indiquent que le signal n'est pas stochastique et que le déterminisme varie en fonction des conditions. Un des résultats les plus marquants est que dans les conditions yeux fermés, le déterminisme augmente alors que la variabilité et l'ampleur du déplacement du CdP augmentent aussi, ce qui, selon les auteurs mêmes est « *contre-intuitif* »* (p. 75) : en effet, dit autrement, plus le signal est ample et variable, plus il est déterminé ! Selon eux, au delà de la variabilité et de l'ampleur des déplacements du CdP, les changements dans la structure temporelle auraient une fonction adaptative. Riley & Turvey (2002) proposent que ces changements dans la structure temporelle des déplacements du CdP seraient liés à des changements comportementaux dans l'organisation des degrés de liberté. Il s'agit alors de partir des idées et méthodologie qu'ils ont développées pour aborder l'effet de différentes contraintes sur le déterminisme dans l'évolution dans le temps du CdP. L'objectif est de caractériser la coordination posturale spontanée, sans avoir recours aux méthodologies qui sur-déterminent la coordination telles que le suivi de cible. Ce travail que nous souhaitons mener s'inscrirait alors dans une démarche à visée épistémique mais aussi technologique au sens entendu par Theureau (2008) : « *la technique n'a a priori rien à voir avec la science. C'est s'il y a une relation organique entre science et technique que nous avons affaire, d'une part, à une science, d'autre part, à une technologie.*⁶³ » (p. 566). A ce jour, les contraintes envisagées sont de nature mécanique, perceptive et émotionnelle; l'état d'avancement étant relatif à l'ordre de l'énumération qui précède. Pour les premières, les mesures seront réalisées chez des patients jeunes - pour exclure des effets connexes liés au strict vieillissement - qui reçoivent une prothèse de hanche⁶⁴. A plus long terme, si elle s'avère discriminante, et sans doute couplée à des mesures qui découleraient de protocoles de suivi de cible (Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma, 1999), il serait alors envisageable de l'utiliser pour développer un outil d'évaluation qui s'appuie non plus sur une vision prescriptive de la posture mais complexe. L'autre contrainte envisagée est de nature perceptive. Les troubles visuels, cécité mais aussi mal-voyance, sont connus pour avoir des effets sur la marche, l'organisation et les oscillations posturales⁶⁵. L'idée est, là aussi, de caractériser l'organisation spatio-temporelle du signal postural. Toutefois, comme vu auparavant, il est nécessaire dans ces différentes expérimentations, de faire co-varier différentes contraintes (Stoffregen *et al.*, 2009). Une solution simple consiste à manipuler la distance d'une cible à fixer. Il est aussi envisageable d'ajouter une dimension d'identification de formes simples ou autres, comme la lecture (Smart *et al.*,

63 Quelques lignes plus loin ce même auteur définit la technologie « ... *comme technique organisée en discours* ».

64 L'usage du futur dans cette phrase est, en toute rigueur, abusif puisque l'acquisition des mesures est en cours de réalisation dans un service orthopédique dans le cadre d'une Thèse de Doctorat que je co-encadre. Toutefois, il s'agit pour l'instant seulement de pré-tests et seulement post-opératoires, alors que les mesures ultérieures pré-opératoires, post-opératoires et post retardées appariées seront plus informatives.

65 Voir ch. 2.3 de ce document.

2004) sur ladite cible. Ce type de protocole qui s'applique bien à des participants voyants, adaptable pour des individus mal-voyants pose évidemment problème pour des personnes atteintes de cécité. Comme le montre l'étude de Stoffregen *et al.* (2009), qui ont utilisé une « moving room sonore », l'usage d'une cible acoustique est envisageable mais pose dans la situation qui nous intéresse des problèmes techniques et méthodologiques non négligeables. Enfin, pour aborder les aspects émotionnels, une étude, exploratoire à ce stade, va être réalisée. Comme l'avaient fait Marin, Bardy & Bootsma (1999), la surface au sol sera, pour les participantes, normale ou réduite à la largeur d'une poutre de gymnastique posée sur le sol. Cette situation sera par ailleurs reproduite, la surface étant cette fois élevée à une hauteur comparable à celle utilisée en compétition de gymnastique. Les gymnastes devront fixer des cibles plus ou moins distantes. Il est prédit, que de la surface de support normale à la surface réduite posée au sol puis à cette dernière surélevée, le déterminisme et la récurrence des déplacements du CdP augmenteront sans que pour autant la surfaces d'oscillation et la variabilité de celui-ci ne le fassent. Par ailleurs, les niveaux d'expertise des participantes seront aussi manipulés, ce qui pourrait permettre d'obtenir pour les entraîneurs de gymnastique des informations utiles.

Le deuxième versant de ce projet concerne toujours l'utilisation de la RQA pour qualifier un signal mais appliquée cette fois-ci à la phase relative hanche / cheville. En effet, les travaux et méthodologie développés par Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999) et poursuivis dans de nombreuses études (comme exposé ch. 3.3), s'ils ont ouvert une voie d'analyse tout à fait novatrice et méritent encore toute notre attention, mettent en jeu une activité posturale fort peu commune. Certes, leur objectif était de dévoiler les mécanismes de la coordination posturale (depuis la validité du paramètre d'ordre en passant par les cinq signatures et l'effet des contraintes) et non de reproduire une situation quotidienne. Néanmoins, une des limites parfois opposée aux approches complexes (mais qui pourrait aussi l'être aux approches cognitivistes) concerne la signification des situations proposées. L'idée est donc d'utiliser ce même paramètre d'ordre mais cette fois-ci pour une tâche dans laquelle la coordination ne serait pas sur-déterminée et, de plus, en appliquant la RQA. Là encore, la posture serait envisagée relativement à une tâche supraposturale et, de façon à rester dans un premier temps dans des situations proches de celles décrites dans la littérature, celle-ci serait de fixer une cible plus ou moins éloignée avec possibilité de faire varier des contraintes telles que la surface, la position des pieds, etc. Conçues au CETAPS, mais mises en oeuvre en collaboration avec et dans le laboratoire du Pr. Savelsbergh (Université d'Amsterdam) de premières mesures ont été réalisées. Il a été demandé aux participants, placés en position érigée sur deux ou une jambe, de fixer une cible plus ou moins éloignée (des condition yeux fermés ont là aussi été

ajoutées). Durant les essais, les angles de la cheville et de la hanche ont été relevés grâce à un système d'enregistrement à mires actives (Optotrak™, fréquence d'acquisition 100 Hz). Les premiers résultats qui ne sont pas tous traités et donc non encore publiés, concernent en plus de la variabilité de l'angle de chaque articulation considérée au cours des essais, le % REC, le %DET ainsi que le TREND appliqués à la phase relative hanche / cheville, plus un quatrième indice, le % ATT. La détermination de ce dernier s'est faite de la manière suivante. Les phases relatives potentielles de 0° à 360° ont été réparties en 16 secteurs. En prenant la phase relative à chaque enregistrement, il a été possible de déterminer le pourcentage d'apparition de chacun des secteurs. Quand un secteur apparaît plus de 6.25% (100% / 16 secteurs) des fois, il est considéré comme attracteur. Lorsque l'on compare les données des sujets en position bipodale en conditions cible proche et cible éloignée, il n'apparaît pas de différence de variabilité de chaque articulation. Par ailleurs, un seul mode de coordination apparaît comme attracteur et est significativement différent des autres, et la récurrence ne varie pas en fonction des conditions. En revanche, le déterminisme du signal et sa dérive augmentent lorsque la contrainte posturale est plus importante (cible éloignée). L'augmentation du déterminisme pourrait correspondre à une augmentation de la contrôlabilité du système alors que celle de la dérive refléterait un processus d'exploration. De la même manière que l'augmentation des oscillations posturales facilite l'exploration de la dynamique de l'interaction animal / environnement (Stoffregen, Pagulayan, Bardy & Hettinger, 2000), la dérive pourrait donner au sujet plus d'information quant à la configuration corporelle relativement à la cible à fixer. On peut aussi noter l'apparition d'un mode en antiphase attractif quand les conditions deviennent plus contraignantes (dans les conditions yeux fermés et unipodale), ce qui est cohérent avec les résultats obtenus dans les tâches de suivi de cible. Ces résultats partiels, s'ils semblent prometteurs, nécessitent encore des réflexions théoriques et des aménagements techniques. Par exemple, il apparaît que l'utilisation de la phase relative continue n'est pas sans poser quelques problèmes lorsque le signal n'est pas sinusoïdal (Peters *et al.*, 2003) ou lorsque les oscillateurs ne sont pas harmoniques (Fuchs, Jirsa, Haken & Kelso, 1996; Fuchs *et al.*, 1996; Zanone & Kelso, 1997). Néanmoins, selon Palut & Zanone (2005), il est possible de dépasser ces problèmes en utilisant des outils mathématiques adaptés. Cette part du travail devrait être réalisée dans le cadre de collaborations avec un laboratoire de mathématiques, dans le cadre du projet « Réseaux d'Interaction et Systèmes Complexes » (RISC) et de l'Institut des Systèmes Complexes en Normandie (ISCN). L'idée serait, cette fois encore, d'envisager différentes contraintes liées à l'organisme à savoir mécaniques et perceptives. Si les premiers résultats ouvrent des perspectives intéressantes, alors des aspects fonctionnels et développementaux seront envisagés. Pour les aspects mécanique et perceptif, le même type de population que celles envisagées pour le premier versant

du projet seraient concernées, alors que pour les autres caractéristiques il s'agirait de populations d'enfants à différents stades de développement ainsi que des enfants atteints de Troubles de l'Acquisition et de la Coordination (TAC). Les aspects développementaux, à ce jour au stade de réflexion, ne pourraient bien sûr se faire que dans le cadre de collaborations avec des collègues spécialistes du domaine. Enfin, à plus long terme, et à condition d'avoir un corpus théorique et empirique convaincants, l'utilisation de ces approches dans la ré-éducation à travers des dispositifs de feedbacks par exemple, pourrait être envisagée associée à ceux développés par Bardy (2006), qui sont, qui plus est, « *appréciés des patients et ludiques* » (p. 75). Cet ensemble aurait aussi pour but, en plus de développer un outil d'évaluation basé sur des approches complexes, de proposer un modèle des effets des contraintes sur la coordination hanche / cheville en posture érigée. Cette partie de modélisation serait aussi faite dans le cadre d'une collaboration avec les mathématiciens dans le cadre du projet RISC⁶⁶. Par ailleurs, le corps du projet, sera aussi le support de deux autres études connexes. D'une part, il permettra de participer à la validation, pour l'étude de la posture, d'un dispositif embarqué d'acquisition du mouvement à base de capteurs inertiels. En effet, le développement de cet outil dans le cadre de l'Equipe de Recherche Technologique interne au CETAPS (ERT MEMTES 1087), en collaboration avec une entreprise, nécessitera une étape de test dans différentes situations de recherche dont celles liées à l'étude de la posture. L'utiliser au cours d'expérimentations parallèlement à des dispositifs plus classiques d'analyse du mouvement permettra de contrôler sa fiabilité, sa fidélité et sa précision. D'autre part, nous disposerons de données concomitantes quant aux déplacements du CdP et à la phase relative hanche / cheville, chez différents publics, dans différentes situations expérimentales. Si, comme le signalent Bardy, Marin, Stoffregen & Bootsma (1999), la relation entre cinétique et cinématique n'est pas univoque, le lien qu'elles entretiennent est sans doute, en fonction de l'interaction des trois grandes contraintes (organisme, tâche, environnement), plus ou moins déterminé (ou stochastique selon le point de vue qu'on adopte). L'idée, pour l'instant au stade de suggestion, est d'explorer le lien qu'entretiennent ces deux variables.

Le second type de projet, pour lequel la réflexion n'en est qu'à ses balbutiements, mais qui, certainement du fait de ma formation originelle, offre à mes yeux énormément d'intérêt, concerne le rapport entre posture et cognition à travers la tâche supra posturale. Ce lien entre coordination posturale et tâche supraposturale a déjà été abordé dans notre laboratoire (Leroy, Thouwarecq & Gautier, 2008) : dans cette étude, l'influence de l'expertise sur le mode d'adaptation de la posture au

⁶⁶ Toujours dans le cadre du projet RISC, un travail de modélisation de coordination dans des activités sportives (escalade, natation) est aussi prévu, auquel je participerai mais dont je ne serai pas meneur, cette partie étant portée par un collègue du CETAPS.

cours du jonglage en cascade a été évaluée en utilisant un système d'analyse du mouvement (Vicon™). Les indices relevés étaient le mouvement de la balle, les mouvements de flexion / extension du coude (droit) et les oscillations latérales du sacrum, qui reflètent les déplacement du centre de masse (Saini, Kerrigan, Thirunarayan & Duff-Raffaele, 1998). Les patrons de déplacements de la balle au cours du jonglage ne différaient pas significativement en fonction du niveau d'expertise et, pour les deux groupes, des oscillations latérales du sacrum dont l'orientation était opposée à la main recevant la balle étaient observées. L'activité posturale facilite ainsi la tâche supraposturale en minimisant, comme le suggèrent Giese, Dijkstra, Schöner & Gielen (1996), les déplacements du centre de masse induits par des perturbations extérieures (comme l'arrivée de la balle). De plus, une latence et une variabilité significativement plus faibles entre flexion / extension maximale du coude d'une part et déplacement latéral du bassin d'autre part caractérisent, là aussi significativement, les experts montrant que l'expertise se traduit dans le lien entre posture et tâche supraposturale dans cette activité cyclique. Il est prévu par la suite de déterminer comment l'expertise influe sur les capacités d'adaptations en perturbant ce lien entre oscillations du bassin et mouvements de bras. Il faut toutefois reconnaître que, d'une part, la perspective théorique n'était pas suffisamment affirmée pour considérer que l'approche était réellement complexe et que d'autre part, la cognition n'entraîne guère en ligne de compte.

Les études que je souhaiterais mener partent de quelques constats simples et débouchent sur des questions encore très générales, Tout d'abord, si dans une approche complexe de la posture, la représentation n'a pas de *prima* et n'est pas la base de la prescription et de procédures d'évaluation dans un système en boucle, cela ne signifie pas qu'elle n'a aucune fonction : elle entre dans l'équation des contraintes qui va faire émerger la coordination posturale mise en jeu. Plus précisément, l'histoire de la situation, ou sa nouveauté vont participer à la coordination de l'action qui va émerger. Par ailleurs, alors que dans le cadre théorique des systèmes complexes appliqué à la posture, il est affirmé qu'elle n'existe qu'au service de la tâche supraposturale, les études en la matière se sont le plus souvent centrées sur un aspect très particulier de cette dernière (en utilisant le plus souvent la « *moving-room* ») : la perception. Or la posture peut être mise au service de bien d'autres tâches continues telle que, par exemple, maintenir un objet en équilibre, ou discrète telle que soulever un objet ou le recevoir comme dans les différentes variations du paradigme du garçon de café (Schmitz, Martin & Assaiante, 2002). Les questions qui se posent sont alors assez simples. La première est plutôt à visée descriptive : quelles coordinations posturales émergent dans ce type de situation ? La seconde, est à visée plus explicative : quelle est l'influence de la connaissance de la situation ou de son histoire sur la coordination posturale mise en jeu ? De plus, aborder cette

question à travers le développement de l'enfant permettrait de participer à la réflexion évoquée plus avant quant aux décalages développementaux entre capacités à orienter et contrôler le mouvement d'une part et à agir sur le monde physique, relativement aux connaissances qu'a l'enfant de ce monde d'autre part. Encore plus que le premier, ce second type de projet nécessite, encore à ce jour, une importante réflexion théorique, probablement de l'imagination en vue de validations expérimentales et nécessairement des collaborations avec des spécialistes du développement.

On peut enfin noter pour conclure que, de fait, ces projets s'inscrivent dans une logique de « science normale », ou, a minima, dans la conviction qu'il faut s'engager dans l'un des deux paradigmes co-existants. En effet, il s'agit simplement, dans une logique cumulative dans un paradigme donné (choisi), de participer à l'élargissement des champs d'application de l'étude de la posture dans des perspectives à la fois épistémique et technologique. Toutefois, le « simplement » utilisé ici, signifie que l'ambition n'est pas de révolutionner le champ théorique et, en aucun cas, que les choses seront faciles et que les projets évoqués se mettront en place sans difficultés théoriques et matérielles. La réalité sera probablement plus modeste que le souhaité. Ceci dit, à mon sens, le rôle de l'Enseignant Chercheur Habilité à Diriger des Recherches n'est pas de résoudre seul toutes ces difficultés (ce qui ne l'exempt pas de participer à leur résolution). Il est plutôt question d'impulser (mais aussi d'arrêter face à des impasses), de donner des moyens (théoriques, techniques et matériels) dans un travail nécessairement collectif. Et donner les moyens théoriques doit, dans ma conception de cette activité, permettre d'identifier clairement les aspects épistémiques et technologiques. Mais surtout, et en particulier dans une période où deux paradigmes coexistent, cela passe par le partage de repères ontologiques et une interrogation quant à la signification des connaissances dans le domaine étudié. Il est certes possible d'ignorer ces problèmes et d'accumuler des résultats, en mettant en jeu de puissants outils techniques et de subtiles méthodologies auxquelles les psychologues de tradition expérimentalistes sont attachés. Mais le risque est alors grand d'oublier qu'elles ne sont pas une fin en soit. Cette question n'est pas nouvelle puisque dès 1934 Bachelard (p. 14) la résumait en signalant qu'« *une méthode excellente finit par perdre sa fécondité si on ne renouvelle pas son objet* ».

Références Bibliographiques

- Abernethy, B. (1990a). Anticipation in squash: differences in advance cue utilization between expert and novice players. *Journal of Sports Sciences*, 8 (1), pp. 17-34.
- Abernethy, B. (1990b). Expertise, visual search and information pick -up in squash. *Perception*, 19, pp. 63-77.
- Abernethy, B. & Sparrow, W.A. (1992). The rise and fall of dominant paradigms in motor behavior research. In J. J. Summers (Ed.), *Approches to the study of motor control and learning*. : Elsevier. pp. 3-45.
- Adamovitch, S. V., Archambault, P. S., Ghafouri, M., Levin, M. F., Poizner, H. & Feldman, A.G. (2001). Hand trajectory invariance in reaching movements involving the trunk. *Experimental Brain Research*, 138, pp. 288-303.
- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3, pp. 111-149.
- Allum, J. H., Bloem, B. R., Carpenter, M. G., Hulliger, M. & Hadders-Algra, M. (1998). Proprioceptive control of posture: a review of new concepts. *Gait and Posture*, 8 (3), pp. 214-242.
- Amazeen, P. G. (2002). Is dynamic the content of a generalized motor program for rhythmic interlimb coordination. *Journal of Motor Behavior*, 34, pp. 233-251.
- Amblard, B. (1998). Les descripteurs du contrôle postural. *Annales de réadaptation et de médecine physique*, 41, pp. 225-237.
- Amblard, B. & Cremieux, J. (1976). Role of visual information concerning movement in the maintenance of postural equilibrium in man. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie Appliquées Aux Effets De L'agression*, 17, pp. 25-36.
- Andler, D. (1992). Introduction aux sciences cognitives. : Gallimard.
- Aruin, A. S. & Latash, M.L. (1995). Directional specificity of postural muscles in feed forward postural reactions during fast voluntary arm movements. *Experimental Brain Research*, 106 (2), pp. 291-300.
- Aruin, A. S., Forest, W. R. & Latash, L. (1998). Anticipatory postural adjustments in conditions of postural instability. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 109 (4), pp. 350-359.
- Assaiante, C. (2001). Bipédie humaine : la conquête de l'équilibre dynamique au cours de l'ontogenèse. *Primatologie*, 4, pp. 231-255.
- Asseman, F. & Gahery, Y. (2005). Effect of head position and visual condition on balance control in inverted stance. *Neuroscience Letters*, 375 (2), pp. 134-137.
- Asseman, F., Caron, O. & Cremieux, J. (2004). Is there a transfer of postural ability from specific to unspecific postures in elite gymnasts?. *Neuroscience Letters*, 358, pp. 83-86.
- Asseman, F., Caron, O. & Cremieux, J. (2008). Are there specific conditions for which expertise in gymnastics could have an effect on postural control and performance?. *Gait and posture*, 27, p. 76_81.
- Association Française de Posturologie, (. (1985). Normes 85. : Association Posture et Equilibre.
- Atlan, H. (1979). Entre le cristal et la fumée. : Editions du Seuil.
- Audiffren, M., Tomporowski, P. D. & Zagrodnik, J. (2008). Acute aerobic exercise and information processing: energizing motor process during a choice reaction time. *Acta Psychologica*, 129, pp. 410-419.
- Bachelard, G. (1934). Le nouvel esprit scientifique. : Presses Universitaire de France.
- Bachelard, G. (1938). La formation de l'esprit scientifique. : Librairie philosophique J. Vrin.
- Baddeley, A. D. & Hitch, G.J. (1974). Working memory. In G. A. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation : advances in research and theory*. : New York Academic Press. p. (vol 8) 47-89.
- Balasubramaniam, R., Riley, M. A. & Turvey, M.T. (2000). Specificity of postural sway to the demands of a precision task. *Gait and Posture*, 11 (1), pp. 12-24.
- Baldissera, F., Cavallari, P., Marini, G. & Tassone, G. (1991). Differential control of in-phase and anti-phase coupling of rhythmic movements of ipsilateral hand and foot. *Experimental Brain Research*, 83, pp. 375-380.
- Balter, S. G., Stokroos, R. J., Akkermans, E. & Kingma, H. (2004). Habituation to galvanic vestibular stimulation for analysis of postural control abilities in gymnasts. *Neuroscience Letters*, 366, pp. 71-75.
- Bardy, B. & Mantel, B. (2006). Ask not what's inside your head, but what your head is inside of (Mace, 1977) . *Intellectica*, 43, pp. 53-58.

- Bardy, B. G. (2006). La formation et la dissolution des états posturaux. In P. Rougier & M. Lacour (Eds.), *De Marey à nos jours : un siècle de recherches sur la posture et le mouvement*. : Solal Marseille. pp. 193-202.
- Bardy, B. G. & Laurent, M. (1998). How is body orientation controlled during somersaulting?. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24 (3), pp. 963-977.
- Bardy, B. G., Lagarde, J., Oullier, O. & Stoffregen, T.A. (2007). On perturbation and pattern coexistence in postural coordination dynamics . *Journal of Motor Behavior*, 28 (1), pp. 326-334.
- Bardy, B. G., Marin, L., Stoffregen, T. A. & Bootsma, R.J. (1999). Postural coordination modes considered as emergent phenomena.. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, pp. 1284-12301.
- Bardy, B. G., Oullier, O., Bootsma, R. J. & Stoffregen, T.A. (2002). Dynamics of human postural transitions. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 28 (3), pp. 499-514.
- Bardy, B. G., Warren, W. H. & Kay, B.A. (1996). Motion parallax is used to control postural sway during walking. *Experimental Brain Research*, 111, pp. 271-282.
- Bardy, B. G., Warren, W. H. & Kay, B.A. (1999). The role of central and peripheral vision in postural control during walking. *Perception and Psychophysics*, 61 (7), pp. 1356-1368.
- Barrel, G. V. & Trippe, H.R. (1975). Field dependance and physical ability. *Perceptual and Motor Skills*, 41, pp. 216-218.
- Baumberger, B., Isableu, B. & Flückinger, M. (2004). The visual control of stability in children and adults: Postural readjustments in ground optical flow. *Experimental Brain Research*, 159, pp. 33-46.
- Beek, P. J., Dessing, J. C., Peper, C. E. & Bullock, D. (2003). Modelling the control of interceptive actions. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 358, pp. 1511-1523.
- Beek, P. J., Peper, C. E. & Stegeman, D.F. (1995). Dynamical models of movement coordination. *Human Movement Science*, 14, pp. 573-608.
- Bekoff, M. & Byers, A. (1998). *Animal play : evolutionary, comparative and ecological perspectives*. : Cambridge University Press.
- Bernstein, N. A. (1967). *The co-ordination and regulation of movements*. : Pergamon Press.
- Bernstein, N. A. (1996). On dexterity and its development. In M. Latash & M. Turvey (Eds.), *On dexterity and its development*. : Lawrence Erlbaum Associates. pp. 9-236.
- Bertenthal, B. I. & Compos, J.J. (1990). A systems approach to the organizing effects of self-produced locomotion during infancy. *Advances in Infancy Research*, 6, pp. 51-98.
- Berthoz, A. (1974). Oculomotricité et proprioception. *Revue d'Electroencéphalographie et de Neurophysiologie Clinique de Langue Française*, 4, pp. 569-586.
- Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. : Odile Jacob.
- Bizzi, E., Hogan, N., Mussa-Ivaldi, F. A. & Gizster, S. (1992). Does the nervous system use equilibrium-point control to guide single and multiple joint movements. *Behavior Brain Science*, 15, pp. 603-613.
- Bonan, I. V., Guettard, E., Leman, M. C., Colle, F. M. & Yelnik, A.P. (2006). subjective visual vertical perception relates to balance in acute stroke. *Archives of physical medicine and rehablity*, 87, pp. 642-646.
- Bootsma, R. (1998). Ecological movement principles and how much information matters. In A. A. Post, J. R. Pijpers, P. Bosh & M. S. J. Boschker (Eds.), *Models in human movement sciences*. : Print Parners Ipskamp. pp. 51-63.
- Bootsma, R. J., Houbiers, M. H. J., Whiting, H. T. A. & van Wieringen, P.C.W. (1991). Acquiring an attacking forehand drive: The effects of static and dynamic environmental conditions. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 62, pp. 276-284.
- Bouisset, S. & Zattara, M. (1987). Biomechanical study of the programming of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement. *Journal of Biomechanics*, 20, pp. 735-742.
- Brady, F. (1995). Sports skill classification, gender and perceptual style. *Perceptual and Motor Skills*, 81, pp. 611-620.
- Brandt, T., Dieterich, M. & Danek, A. (1994). Vestibular cortex lesions affect the perception of verticality. *Annals of Neurology*, 35 (4), pp. 383-384.
- Bringoux, L., Marin, L., Nougier, V., Barraud, P. A. & Raphel, C. (2000). Effects of gymnastics expertise on the perception of body orientation in the pitch dimension. *Journal of vestibular research*, 10, pp. 251-258.
- Bruner, J. (1997). *Car la culture donne forme à l'esprit*. : Georg.

- Buchanan, J. J. & Horak, F.B. (1999). Emergence of postural patterns as a function of vision and translation frequency. *Journal of Neurophysiology*, 81, pp. 2325-2339.
- Bullinger, A. (2004). Le développement sensori-moteur de l'enfant et ses avatars. : Eres.
- Burgess-Limerick, R., Abernethy, B. & Neal, R. (1993). Relative phase quantifies interjoint coordination. *Journal of Biomechanics*, 26 (1), pp. 91-94.
- Butterworth, G. & Hopkins, B. (1988). Hand-mouth coordination in the new-born baby. *British Journal of Developmental Psychology*, 6 (4), pp. 303-314.
- Byblow, W. D., Carson, R. G. & Goodman, D. (1994). Expression of asymmetries and anchoring in bimanual coordination. *Human Movement Science*, 13, pp. 3-28.
- Camazine, S., deneubourg, J. L., Francks, N. R., Sneyd, J., Theraulaz, G. & Bonabeau, E. (2001). Self organization in biological systems. : Princeton University Press.
- Carpenter, R. H. S. (1988). Movements of eyes (2nde ed.). : Pion.
- Carson, R. G., Byblow, W. D., Abernethy, B. & Summers, J.J. (1996). The contribution of inherent and incidental constraints to intentional switching between patterns of bimanual coordination . *Human Movement Science*, 15, pp. 565-589.
- Carter, M. C. & Shapiro, D.C. (1984). Control of sequential movements: evidence for generalized motor programs. *Journal of Neurophysiology*, 52 (5), pp. 5787-5796.
- Changeux, J. P. (1997). Variation and selection in neural function. *Trends in Neurosciences*, 20, pp. 291-293.
- Chemero, A., Klein, C. & Cordeiro, W. (2003). Events as changes in the layout of affordances. *Ecological Psychology*, 15 (1), pp. 19-28.
- Chen, L. C., Metcalfe, J. S., Jeka, J. J. & Clark, J.E. (2006). Two steps forward and one back : learning to walk affects infant's sitting posture. *Infant Behavior Development*, 30 (1), pp. 16-25.
- Chi, M. T. H. (2006). Two approaches to the study of experts' characteristics. In K. A. Ericsson, N. Charness, Feltovich P & R. Hoffman (Eds.), *Cambridge handbook of expertise and expert performance* . : Cambridge University Press.. pp. 121-130.
- Chiang, J. & Wu, G. (1997). The influence of foam surfaces on biomechanical variables contributing to postural control. *Gait and Posture*, 5 (3), pp. 239-245.
- Chiel, H. & Beer, R. (1997). Brain, body and environmental interactions in adaptive behavior. *Trends in Neurosciences*, 20 (12), pp. 553-557.
- Chomsky, N. (1971). Aspects de la théorie e la syntaxe, 1965 (traduction française). : Seuil.
- Clapp, S. & Wing, A.M. (1999). Light touch contribution to balance in normal bipedal stance. *Experimental Brain Research*, 125 (4), pp. 521-524.
- Clark, S. & Riley, M.A. (2006). Multisensory information for postural control: Sway-referencing gain shapes center of pressure variability and temporal dynamics.. *Experimental Brain Research*, 176 (2), pp. 299-310.
- Clement, G. & Rezzette, D. (1985). Motor behavior underlying the control of an upside-down vertical posture. *Experimental Brain Research*, 59 (3), pp. 478-484.
- Clement, G., Gurfinkel, V. S., Lestienne, F., Lipshits, M. I. & Popov, K.E. (1984). Adaptation of postural control to weightlessness. *Experimental Brain Research*, 57, pp. 61-72.
- Clement, G., Pozzo, T. & Berthoz, A. (1988). Contribution of eye positioning to control of the upsided-down standing posture. *Experimental Brain Research*, 59 (3), pp. 569-576.
- Coates, S. W. (1972). Manual for th preschool embedded figure tests. : Palo Alto : Consulting psychologists Press.
- Collins, J. J. & De Luca, C.J. (1993). Open-loop and closed-loop control of posture: a random-walk analysis of center of pressure trajectories. *Experimental Brain Research*, 95 (2), pp. 308-318.
- Collins, J. J. & De Luca, C.J. (1995). The effects of of visual input on open loop and closed loop postural control mechanisms. *Experimental Brain Research*, 103 (1), pp. 151-163.
- Cordo, P., Gurfinkel, V. S., Bevan, L. & Kerr, G.K. (1995). Prprioceptive consequences of tendon vibration during movement. *Journal of Neurophysiology*, 74 (4), pp. 1675-1688.
- Corna, S., Tarantola, J., Nardone, A., Giordano, A. & Schieppati, M. (1999). Standing on a continuously moving platform: is body inertia counteracted or exploited?. *Experimental Brain Research*, 124, p. 331-341.
- Cotsaftis, M. (2008). A Passage to Complex Systems. In C. Bertelle, G. H. E. Duchamp & H. Kadri-Dahmani (Eds.), *Complex Systems and Self-organization Modelling*. : SpringerVerlag. pp. 3-20.

- Craighero, L., Fadiga, L., Rizzolatti, G. & Umiltà, C. (1999). Action for perception: a motor-visual attentional effect. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 25, pp. 1673-1692.
- Creath, R., Kiemel, T., Horak, F., Peterka, R. & Jeka, J. (2005). A unified view of quiet and perturbed stance: simultaneous co-existing excitable modes. *Neuroscience Letters*, 377, pp. 75-80.
- Croix, G. (2007). *Contribution relative des informations sensorielles au maintien de l'Appui Tendu Renversé*. Thèse de Doctorat, Université de Rouen
- Croix, G., Chollet, D. & Thouvarecq, R. (2010). Effect of expertise level on the perceptual characteristics of gymnasts. *The Journal of Strength and Conditioning Research*, 24 (6), pp. 1942-1947.
- Croix, G., Lejeune, L., Anderson, D. I. & Thouvarecq, R. (2010). Light fingertip contact on thigh facilitates handstand balance in gymnasts. *Psychology of Sports and Exercise*, 11, pp. 330-333.
- Croix, G., Thouvarecq, R. & Baguelin, X. (2002). Effet d'un entraînement proprioceptif sur le maintien de l'ATR. *Dossier EPS*, 57, pp. 67-70.
- Danion, F., Boyadjian, A. & Marin, L. (2000). Control of locomotion in expert gymnasts in the absence of vision. *Journal of Sports Sciences*, 18, pp. 809-814.
- Danis, C. G., Krebs, D. E., Gill-Body, K. M. & Sahrman, S. (1998). Relationship between standing posture and stability. *Physical Therapy*, 78 (5), pp. 502-517.
- Davranche, K., Burle, B., Audiffren, M. & Hasbroucq, T. (2006). Physical exercise facilitates motor process in simple reaction time performance: an electromyographic analysis. *Neurosciences Letters*, 396, pp. 54-56.
- Day, B. L., Steiger, M. J., Thompson, P. D. & Mardsen, C.D. (1993). Effect of vision and stance width on human body motion when standing: implications for afferent control of lateral sway. *Journal of Physiology*, 469, pp. 479-499.
- de Rugy, A., Taga, G., Montagne, Buekers, M. J. & Laurent, M. (2002). Perception–action coupling model for human locomotor pointing. *Biological Cybernetics*, 87, pp. 141-150.
- Decety, J. & Jeannerod, M. (1995). Mentally simulated movements in virtual reality: does Fitts's law hold in motor imagery?. *Behavioural Brain Research*, 72, pp. 127-134.
- Decety, J., Jeannerod, M., Germain, M. & Pastene, J. (1991). Vegetative response during imagined movement is proportional to mental effort. *Behavioral Brain Research*, 42, pp. 1-5.
- Delignières, D. (2009). *Complexité et compétences*. : Editions Revue EPS.
- Deneubourg, J. L. (1977). Application de l'ordre par fluctuations à la description de certaines étapes de construction du nid chez les termites. *Insectes Sociaux*, 24, pp. 117-130.
- Depraz, N. (2006). *Comprendre la phénoménologie une pratique concrète*. : Armand colin.
- Dichgans, J., Held, R., Young, L. R. & Brandt, T. (1972). Moving visual scenes influence the apparent direction of gravity. *Science*, 178, pp. 1217-1219.
- Dickstein, R., Shupert, C. & Horak, F.B. (2001). Fingertip touch improves postural stability in patients with peripheral neuropathy. *Gait and Posture*, 14 (3), pp. 238-247.
- Diedrich, F. J. & Warren, W.H. (1995). Why Change Gaits? Dynamics of the Walk-Run Transition. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21 (1), pp. 183-202.
- Dietz, V. (1992). Human neuronal control of automatic functional movements: interaction between central programs and afferent input. *Physiological review*, 72 (1), pp. 33-69.
- Dupuy, J. P. (1994). *Aux origines des sciences cognitives*. : La Découverte.
- Edelman, G. M. (1993). Neural darwinism: selection and reentrant signaling in higher brain function. *Neuron*, 10, pp. 115-125.
- Eklund, G. (1972). General features of of vibration induced effects on balance. *Upsala Journal of Medical Sciences*, 77 (2), pp. 112-124.
- Ericsson, K. A. (2008). Deliberate practice and acquisition of expert performance: a general overview.. *Academic emergency medicine*, 15 (11), pp. 988-994.
- Fajen, B. R. (2005). Perceiving possibilities for action: On the necessity of calibration and perceptual learning for the visual guidance of action . *Perception*, 34, pp. 717-740.
- Faugloire, E., Bardy, B. G. & Stoffregen, T.A. (2006). Dynamics of learning new postural patterns: influence on preexisting spontaneous behaviors . *Journal of Motor Behavior*, 38 (4), pp. 299-312.
- Faugloire, E., Bardy, B. G., Merhi, O. & Stoffregen, T.A. (2005). Exploring coordination dynamics of the postural system with real-time visual feedback . *Neuroscience Letters*, 374, pp. 136-141.

- Faugloire, E., Bardy, E. & Stoffregen, T.A. (2009). (De)Stabilization of required and spontaneous postural dynamics with learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35 (1), pp. 170-187.
- Feigenberg, I. M. & Latash, L.P. (1996). N. A. Bernstein : the reformer of neuroscience. In M. Latash & M. Turvey (Eds.), *On dexterity and its development*. : Lawrence Erlbaum Associates. pp. 247-275.
- Feldman, A. G. & Levin, M.F. (1995). Positional frames of reference in motor control: the origin and use. *Behavioral and Brain Sciences*, 18, pp. 723-806.
- Ferber, J. (1995). Les systèmes multi-agents: vers une intelligence collective. : IIA, InterEditions.
- Feynman, R. P. (1995). How Nature handles complexity. In J. S. Kelso (Ed.), *Dynamic patterns: the self-organization of brain and behavior*. : MIT Press. pp. 1-28.
- Fink, P. W., Foo, P. & Jirsa, V.K. (2000). Local and global stabilization of coordination by sensory information. *Experimental Brain Research*, 134, pp. 9-20.
- Fitts, P. M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, pp. 381-391.
- Fitzpatrick, R. & McCloskey, D.I. (1994). Proprioceptive, visual and vestibular thresholds for perception of sway during standing in humans. *Journal of Physiology*, 478, pp. 173-186.
- Fontaine, R. J., Lee, T. D. & Swinnen, S.P. (1997). Learning a new bimanual pattern: Reciprocal influence of intrinsic and to-be-learned patterns. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 51, pp. 1-9.
- Forget, R. & Lamarre, Y. (1990). Anticipatory postural adjustments in the absence of normal peripheral feedback. *Brain Research*, 508 (1), pp. 176-179.
- Fourcade, P., Bardy, B. G. & Bonnet, C. (2003). Modeling postural transitions in human posture. In S. Rogers & J. Effken (Eds.), *Studies in perception and action Studies in perception and action VII*. : Lawrence Erlbaum. pp. 99-103.
- Fuchs, A., Jirsa, V. K. & Kelso, J.S. (2000). Theory of the Relation between Human Brain Activity (MEG) and Hand Movements. *NeuroImage*, 11, pp. 359-369.
- Fuchs, A., Jirsa, V. K., Haken, H. & Kelso, J.S. (1996). Extending the HKB model of coordinated movements to oscillators with different eigenfrequencies. *Biological Cybernetics*, 74, pp. 21-30.
- Fuchs, A., Kelso, J. S. & Haken, H. (1992). Phase transitions in the human brain : spatial mode dynamics. *International Journal of Bifurcation and chaos*, 2 (4), pp. 817-839.
- Fujisawa, N., Masuda, T., Inakoa, Y., Fukuoka, H., Ishida, A. & Minamitani, H. (2005). Human standing control depending on adopted strategies. *Medical and Biological engineering and computing*, 43 (1), pp. 107-114.
- Gandevia, S. C., Refshauge, K. M. & Collins, D.F. (2002). Proprioception: peripheral inputs and perceptual interactions. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 508, pp. 61-68.
- Gapenne, O. & Rovira, K. (1999). Gestalt Psychologie et cognition sans langage. *Actualité d'une figure historique*. *Intellectica*, 28, pp. 229-250.
- Gatev, P., Thomas, S., Thomas, K. & Hallett, M. (1999). Feedforward ankle strategy of balance during quiet stance in adults. *Journal of Physiology*, 514 (3), pp. 915-928.
- Gautier, G. (2007). *Influence de l'expérience sur le contrôle postural : effet de l'expertise gymnique*. Thèse de Doctorat, Université de Rouen
- Gautier, G., Marin, L., Leroy, D. & Thouvaecq, R. (2009). Dynamics of expertise level: Coordination in handstand. *Human Movement Science*, 28, pp. 129-140.
- Gautier, G., Thouvaecq, R. & Chollet, D. (2007). Visual and postural control of an arbitrary posture: the handstand. *Journal of Sports Sciences*, 25, pp. 1271-1278.
- Gautier, G., Thouvaecq, R. & Larue, J. (2008). Influence of experience on postural control: effect of expertise in gymnastics. *Journal of Motor Behavior*, 40, pp. 400-408.
- Gautier, G., Thouvaecq, R. & Vuillerme, N. (2008). Postural control and perceptive configuration: influence of expertise in gymnastics. *Gait & Posture*, 28, pp. 46-51.
- Gell-Mann, M. (1995). What is complexity ?. *Complexity*, 1 (1), .
- Gentaz, E., Baud-Bovy, G. & Luyat, M. (2008). The haptic perception of spatial orientations. *Experimental Brain Research*, 187 (3), pp. 331-348.
- Gentaz, E., Luyat, M., Cian, C., Hatwell, Y., Barthaud, P. A. & Raphel, C. (2001). The reproduction of vertical and oblique orientations in the visual haptic and somato-vestibular systems. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54, pp. 513-526.

- Gerard, J., Gonzales, G., Guilhem, C., Le Pendu, Y., Quenette, P. & Richard-Hansen, C. (1994). Emergences collectives chez les ongulés sauvages. In G. Theraulaz & F. Spitz (Eds.), *Auto-organisation et comportement*. : Hermes. pp. 171-186.
- Geruschat, D. & Turano, K.A. (2002). Connecting research on retinis pigmentosa to the paractice of orientation and mobility. *Journal of visual impairment and Blindness*, 96, pp. 69-85.
- Ghafouri, M., Archambault, P. S., Adamovich, S. V. & Feldman, A.G. (2002). Pointing movements may be produced in different frames of reference depending on the task demand. *Brain Research*, 929, pp. 117-128.
- Gibson, E. J. (1969). principles of perceptual development . : Appleton-Century-Crofts.
- Gibson, E. J., Riccio, G., Schmuckler, M. A., Stoffregen, T. A., Rosenberg, D. & Taormina, J. (1987). Detection of the traversability of surfaces by crawling and walking infants. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 13, pp. 533-544.
- Gibson, J. J. (1950). The perception of the visual world. : The Riverside Press.
- Gibson, J. J. (1958). Visually Controlled Locomotion and visual orientation in animals. *British Journal of Psychology*, 49, pp. 182-194.
- Gibson, J. J. (1962). Observation on active touch. *Psychological Review*, 69 (6), pp. 477-491.
- Gibson, J. J. (1966). The senses considered as perceptual system. : Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1977). The theory of affordances. In R. E. Shaw & J. Brandsford (Eds.), *Perceiving, acting and knowing*. : Lawrence Erlbaum. pp. 67-82.
- Gibson, J. J. (1979). The ecological approach to visual perception. : LawrErlbaum Publisher.
- Giese, M. A., Dijkstra, T. M., Schöner, G. & Gielen, C.C. (1996). Identification of the nonlinear state-space dynamics of the action-perception cycle for visually induced postural sway. *Biological Cybernetics*, 74, pp. 427-437.
- Gladwin, T. (1964). Culture and logical Process. In W. H. Goodenough (Ed.), *Explorations in cultural anthropology: Essays in honor of George Peter Murdock*. : McGraw Hill. pp. 167-177.
- Goldfield, E. C. (1995). Emergent forms: origins and early development of human action and percpetpion. : Oxford University Press.
- Gollhofer, A., Horstmann, G. A., Berger, W. & Dietz, V. (1989). Compensation of translational and rotational perturbations in human posture: stabilization of the center of gravity. *Neuroscience Letters*, 105, pp. 73-78.
- Golomer, E., Cremieux, J., Dupui, P., Isableu, B. & Ohlmann, T. (1999). Visual contribution to self-induced body sway frequencies and visual perception of male professional dancers. *Neuroscience Letters*, 267 (3), pp. 189-192.
- Goodale, M. & Milner, D. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15 (1), pp. 20-25.
- Goss, S., Deneubourg, J. L., Aron, S., Beckers, R. & Pasteels, J.M. (1990). How trail lying and trail following can solve foraging problem of ants colony. In R. N. Hugues (Ed.), *Behavioural mechanisms of food selection*. : Springer Verlag, Heidelberg. pp. 661-678.
- Goulet, C., Bard, C. & Fleury, M. (1989). Expertise differences in preparing to return a tennis serve: a visual information processing approach. *Journal of Sport and Exercise Psychology*, 11, pp. 382-398.
- Gracco, G. L. & Abbs, J.S. (1986). Variant and invariant characteristics of speech movements. *Experimental Brain Research*, 65, pp. 156-166.
- Grasso, R., Bianchi, L. & Lacquaniti, F. (1998). Motor patterns for human gait: Backward versus forward locomotion. *Journal of Neurophysiology*, 80 (4), pp. 1868-1885.
- Grenier, A. (1981). ["Liberated" motricity by holding the head during the first weeks of life (author's transl)]. *Archives Francaises de Pediatrie*, 38, pp. 557-561.
- Guastello, S. J. (2006). Motor control research requires nonlinear dynamics. *American Psychologist*, 61, pp. 77-78.
- Guerraz, M., Sakellari, V., Burchill, P. & Bronstein, A.M. (2000). nfluence of motion parallax in the control of spontaneous body sway. *Experimental Brain Research*, 131 (2), pp. 244-252.
- Gurfinkel, V. S. & Elnor, A.M. (1973). On two types of static disturbances in patients with local lesions of the brain. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie Appliquees Aux Effets De L'agression*, 14D, pp. 65-72.
- Gurfinkel, V. S. & Levik, Y. (1991). Perceptual and automatic aspects of the postural body Scheme. In J. Paillard (Ed.), *Brain and Space*. : Oxford University Press. pp. 145-182.

- Gurfinkel, V. S., Lestienne, F., Levik, Y. S., Popov, K. E. & Lefort, L. (1993). Egocentric references and human spatial orientation in microgravity, II. Body centred coordinates in the task of drawing ellipses with prescribed orientation. *Experimental Brain Research*, 95 (2), pp. 343-348.
- Guridi, J., Rodriguez-Oroz, M. C., Lozano, A. M., Moro, E., Albanese, A., Nuttin, B., Gybels, J. et al. (2000). Targeting the basal ganglia for deep brain stimulation in Parkinson's disease. *Neurology*, 55, p. S21-8.
- Hadders-Algra, M. (2001a). Early Brain Damage and the development of motor behavior in children: cues for therapeutic intervention. *Neural Plasticity*, 8 (1-2), pp. 289-298.
- Hadders-Algra, M. (2001b). Early Brain Damage and the development of motor behavior in children: cues for therapeutic intervention. *Neural Plasticity*, 8 (1-2), pp. 31-49.
- Hafström, A., Fransson, P. A., Karlberg, M., Ledin, M. & Magnusson, M. (2001). Readiness to receive visual information affects postural control and adaptation. In J. Duysens, C. M. Bouwien, B. Smit-Engelsman & H. Kingma (Eds.), *Control of posture and gait*. : International Society of Posture and Gait Research. pp. 285-289.
- Haken, H. (1983). *Synergetics : an introduction*. Springer Verlag.
- Haken, H. (1985). *Synergetics : an interdisciplinary approach to phenomena of self organization*. *Geoforum; Journal of Physical, Human, and Regional Geosciences*, 16 (2), pp. 205-211.
- Haken, H. (2000). *Information and self organization*. : Springer-Verlag.
- Haken, H., Kelso, J. S. & Bunz, H. (1985). A Theoretical Model of Phase Transitions in Human Hand Movements. *Biological Cybernetics*, 51, pp. 347-356.
- Hick, W. E. (1952). On the rate of gain of information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, pp. 11-26.
- Hilber, P., Jouen, F., Delhay-Bouchaud, N., Mariani, J. & Caston, J. (1998). Differential role of cerebellar cortex and deep cerebellar nuclei in learning and retention of a spatial task: studies in intact and cerebellectomized lurcher mutant mice. *Behavioral Genetics*, 28 (4), pp. 299-308.
- Hirose, M. & Ogawa, K. (2007). Honda humanoid robots development. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, pp. 11-19.
- Hlavacka, F., Krizkova, M. & Horak, F.B. (1995). Modification of human postural response to leg muscle vibration by electrical vestibular stimulation. *Neuroscience Letters*, 189 (1), pp. 9-12.
- Hlavacka, F., Mergner, T. & Krizkova, M. (1996). Control of body vertical by vestibular and proprioceptive inputs. *Brain Research Bulletin*, 40 (5-6), pp. 431-434.
- Holden, M., Ventura, J. & Lackner, J. (1994). Stabilization of posture by precision contact of the index finger. *Journal of vestibular research*, 4 (4), pp. 285-301.
- Horak, F. B. (2006). Postural orientation and equilibrium: what do we need to know about neural control of balance to prevent falls?. *Age and Ageing*, 35-S2, p. ii7-ii11.
- Horak, F. B. & Nashner, L.M. (1986). Central programming of postural movements: adaptation to altered support-surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55 (6), pp. 1369-1381.
- Horak, F. B., Nashner, L. M. & Diener, H.C. (1990). Postural strategies associated with somatosensory and vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 82, pp. 167-177.
- Houdé, O., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2002). La naissance d'une nouvelle discipline : l'imagerie cérébrale fonctionnelle. In O. Houdé, B. Mazoyer & N. Tzourio-Mazoyer (Eds.), *Cerveau et psychologie*. : Presses Universitaires de France. pp. 3-27.
- Howard, I. P. & Templeton, W.B. (1966). *Human spatial orientation*. : John Wiley.
- Hoyt, D. F. & Taylor, C.R. (1981). Gait and energetics of locomotion in horses. *Nature*, 292, pp. 239-240.
- Hubel, D. H. & Wiesel, T.N. (1959). Receptive fields of single neurons in the cat's striate cortex. *Journal of physiology*, 148, pp. 574-591.
- Hugel, F., Cadopi, M., Kohler, F. & Perrin, P. (1999). Postural control of ballet dancers: A specific use of visual input for artistic purposes. *International Journal of Sports Medicine*, 20, pp. 86-92.
- Huteau, M. (1987). *Style cognitif et personnalité : la dépendance à l'égard du champ*. : Presses Universitaires de Lille.
- Imbert, M. (1992). *Neurosciences et sciences cognitives*. In D. Andler (Ed.), *Introduction aux sciences cognitives*. : Folio essais. pp. 49-75.
- Isableu, B. & Vuillerme, N. (2006). Differential integration of kinaesthetic signals to postural control. *Experimental Brain Research*, 174, pp. 763-768.

- Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J. & Amblard, B. (1997). Selection of spatial frame of reference and postural control variability. *Experimental Brain Research*, 114, pp. 584-589.
- Isableu, B., Ohlmann, T., Cremieux, J. & Amblard, B. (1998). How dynamic visual field dependence-independence interacts with the visual contribution to postural control. *Human Movement Science*, 17, pp. 367-391.
- Ivanenko, Y. P., Grasso, R. & Lacquaniti, F. (1999). Effect of gaze on postural responses to neck proprioceptive and vestibular stimulation in humans. *Journal of Physiology*, 519, pp. 301-314.
- Jahanshahi, M., Ardouin, C. M., Brown, R. G., Rothwell, J. C., Obeso, J., Albanese, A., Rodriguez-Oroz, M. C. et al. (2000). The impact of deep brain stimulation on executive function in Parkinson's disease. *Brain : a Journal of Neurology*, 123 (Pt 6), pp. 1142-1154.
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain : neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and brain sciences*, 17, pp. 187-245.
- Jeannerod, M. (2001). Neural stimulation of action: a unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14, pp. 103-109.
- Jeannerod, M. (2002). Les neurosciences à l'orée du 21ème siècle. *Etudes*, 4, pp. 469-481.
- Jeka, J. & Lackner, J.R. (1994). Fingertip contact influences human postural control.. *Experimental Brain Research*, 100, pp. 495-502.
- Jeka, J. J. & Kelso, J.S. (1995). Manipulating symmetry in the coordination dynamics of human movement. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 21, pp. 360-374.
- Jeka, J. J. & Lackner, J.R. (1995). The role of haptic cues from rough and slippery surfaces in human postural control. *Experimental Brain Research*, 103 (2), pp. 267-276.
- Jeka, J. J., Kelso, J. S. & Kiemel, T. (1993). Spontaneous transition and symmetry: pattern dynamics in human four-limb coordination. *Human Movement Science*, 12, pp. 627-651.
- Jones, K. S. (2003). What is affordance. *Ecological Psychology*, 15 (2), pp. 107-114.
- Jouen, F. & Molina, M. (2007). Naissance et connaissance. : Editions Mardaga.
- Karnath, H. O., Ferber, S. & Dichgans, J. (2000). The neural representation of postural control in humans. *The Proceedings of the National Academy of Sciences (US)*, 97 (25), pp. 13931-13936.
- Kavounoudias, A., Gilhodes, J. C., Roll, R. & Roll, J. (1999). From balance regulation to body orientation: two goals for muscle proprioceptive information processing? . *Experimental Brain Research*, 124 (1), pp. 80-88.
- Kawato, M., Furukawa, K. & Suzuki, R. (1987). A hierarchical neural-network model for control and learning of voluntary movement. *Biological Cybernetics*, 57, pp. 169-185.
- Kay, B. A., Kelso, J. S., Saltzman, E. L. & Schoner, G.S. (1987). The space-time behavior of single and bimanual movements: data and limit cycle. *Journal of experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, pp. 178-192.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychology Bulletin*, 70, pp. 387-403.
- Kelso, J. A. S. (1984). Phase transitions and critical behavior in human bimanual coordination. *American Journal of Physiology: Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, 15, p. R1000-R1004.
- Kelso, J. S. (1994). Elementary coordination dynamics. In S. P. Swinnen, J. Massion, H. Heuer & P. Casaer (Eds.), *Interlimb coordination: Neural, dynamical, and cognitive constraint*. : Academic press, INC. pp. 301-318.
- Kelso, J. S. (1995). Dynamic patterns: the self-organization of brain and behavior. : MIT Press.
- Kelso, J. S. & Jeka, J.J. (1992). Symmetry breaking dynamics of human multilimb coordination. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, pp. 645-668.
- Kelso, J. S. & Norman, P.E. (1978). Motor schema formation in children. *Developmental Psychology*, 14 (2), pp. 153-156.
- Kelso, J. S. & Schoner, G. (1988). Self-organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, 7, pp. 27-46.
- Kelso, J. S. & Zanone, P.G. (2002). Coordination dynamics of learning and transfer across different effector systems.. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28 (4), pp. 776-797.
- Kelso, J. S., Delcolle, J. & Schoner, R. (1990). Action-perception as a pattern formation process. In M. Jeannerod (Ed.), *Attention and performance XIII*. : Lawrence Erlbaum. .
- Kelso, J. S., Fink, P. W., DeLaplain, C. R. & Carson, R.G. (2001). Haptic information stabilizes and destabilizes coordination dynamics . *Proceedings of the Royal Society B*, 268, pp. 1207-1213.

- Kelso, J. S., Fuchs, A., Lancaster, R., Holroyd, T., Cheyne, D. & Weinberg, H. (1998). Dynamical cortical activity in the human reveals motor equivalence. *Nature*, 392, pp. 814-818.
- Kelso, J. S., Southard, D. L. & Goodman, D. (1979). On the coordination of two-handed movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 5 (2), pp. 229-238.
- Kerr, B., Condon, S. & McDonald, L.A. (1985). Cognitive spatial processing and the regulation of posture. *Journal of Experimental Psychology*, 11, pp. 617-622.
- Kerwin, D. G. & Trewartha, G. (2001). Strategies for maintaining a handstand in the antero-posterior direction. *Medicine and Science in Sport and Exercise*, 33 (7), pp. 1182-1188.
- Kirlik, A. (2004). On Stoffregen's definition of affordances. *Ecological Psychology*, 16 (1), pp. 73-77.
- Klapp, S. T., Hill, M. D., Tyler, J. G., Jagacinski, R. J. & Jones, M.R. (1985). On marching to two different drummers: perceptual aspects of the difficulties. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11, pp. 814-827.
- Klevberg, G. L. & Anderson, D.I. (2002). Visual and haptic perception of postural affordances in children and adults. *Human Movement Science*, 21 (2), p. 169-186..
- Kluzik, J., Horak, F. B. & Peterka, R.J. (2005). Differences in preferred reference frames for postural orientation shown by after-effects of stance on an inclined surface. *Experimental Brain Research*, 162, pp. 474-489.
- Kohler, W. (1964). *La psychologie de la forme* (traduction). : Gallimard).
- Kosslyn, S. M. (1977). Imagery, propositions, and the form of internal representations. *Cognitive Psychology*, 9, pp. 52-76.
- Kosslyn, S., DiGirolamo, G., Thompson, W. & Alpert, N. (1998). Mental rotation of objects versus hands: neural mechanisms revealed by positron emission tomography. *Psychophysiology*, 35, pp. 151-161.
- Kosslyn, S., Ganis, G. & Thompson, W. (2001). Neural foundations of imagery. *Nature Review Neurosciences*, 2, pp. 635-642.
- Kostrubiec, V. & Zanone, P.G. (2002). Memory dynamics: Distance between the new task and existing behavioural patterns affects learning and interference in bimanual coordination in humans. *Neuroscience Letters*, 331, pp. 193-197.
- Kugler, P. & Turvey, M.T. (1988). Self-organisation, flow fields, and information. *Human Movement Science*, 7, pp. 97-129.
- Kugler, P. N. & Turvey, M.T. (1987). *Information, natural law and the self assembly of rhythmic movement*. : Lawrence Erlbaum .
- Kugler, P. N., Kelso, J. S. & Turvey, M.T. (1980). On the concept of coordinative structures as dissipative structures: theoretical lines of convergence. In Stelmach G E & J. Requin (Eds.), *Tutorials in Motor Behavior*. : North-Holland Publishing Company. pp. 3-47.
- Kugler, P. N., Kelso, J. S. & Turvey, M.T. (1982). On the control and co-ordination of naturally developing systems. In J. S. Kelso & Clark J E (Eds.), *The development of movement control and co-ordination*. : John Wiley & Sons. ltd. pp. 5-78.
- Kuhn, T. (1962). *La structure des révolutions scientifiques*. : Flammarion.
- Kuo, A. D. (1995). An optimal control model for analyzing human postural balance. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 42 (1), pp. 87-101.
- Kuo, A. D. & Zajack, E. (1993). Human standing posture: multi-joint movement strategies based on biomechanical constraints. In J. H. J. Allum, D. J. Allum-Mecklenburg, F. P. Harris & R. Probst (Eds.), *Progress in Brain Research 97*. : Elsevier. pp. 349-358.
- Lackner, J. R., DiZio, P., Jeka, J., Horak, F., Krebs, D. & Rabin, E. (1999). Precision contact of the fingertip reduces postural sway of individuals with bilateral vestibular loss. *Experimental Brain Research*, 126 (4), pp. 459-466.
- Lackner, J. R., Rabin, E. & DiZio, P. (2000). Fingertip contact suppresses the destabilizing influence of leg muscle vibration. *Journal of Neurophysiology*, 84 (5), pp. 2217-2224.
- Lackner, J. R., Rabin, E. & DiZio, P. (2001). Stabilization of posture by precision touch of the index finger with rigid and flexible filaments. *Experimental Brain Research*, 139 (4), pp. 454-464.
- Lacquaniti, F. (1992). Automatic control of limb movement and posture. *Current Opinion in Neurobiology*, 2 (6), pp. 807-814.
- Lafosse, C., Kerckhofs, E., Troch, M., Vereeck, L., Van Hoydonck, G., Moeremans, M., Broeckx, J. et al. (2005). Contraversive pushing and inattention of the contralesional hemisphere. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology : Official Journal of the International Neuropsychological Society*, 27, pp. 460-484.

- Lajoie, Y., Teasdale, N., Bard, C. & Fleury, M. (1993). Attentional demands for static and dynamic equilibrium. *Experimental Brain Research*, 97, pp. 139-144.
- Langlois, P. (2010). Simulation des systèmes complexes en géographie. : Hermes Lavoisier.
- Larue, J., Bard, C., Fleury, M., Teasdale, N. & Paillard, J. (1992). Rôle des afférences proprioceptives et cutanées dans le contrôle des mouvements de pointage en amplitude. In M. Laurent, J. F. Marian, R. Pfister & P. Therme (Eds.), *Recherches en APS 3. : Actio / Université Aix-Marseille II*. pp. 101-109.
- Laurent, M., Montagne, G. & Durey, A. (1996). Binocular invariants in interceptive tasks: A directed perception approach. *Perception*, 25, pp. 1437-1450.
- Lave, J. (1988). *Arithmetics in practice*. : Harvard University Press.
- Le Runigo, C., Benguigui, N. & Bardy, B.G. (2005). Perception-action coupling and expertise in interceptive actions. *Human Movement Science*, 24 (3), pp. 429-445.
- Lee, D. N. (1974). Visual information during locomotion. In R. B. MacLeod & H. L. Pick (Eds.), *Perception: Essays in Honor of James J. Gibson*. : Cornell University Press. pp. 250-267.
- Lee, D. N. (1976). A theory of visual control of braking based on information about time to collision. *Perception*, 5, pp. 437-459.
- Lee, D. N. (2009). Author's update General Tau Theory: evolution to date. *Perception*, 38, pp. 837-858.
- Lee, D. N. & Aronson, E. (1974). Visual proprioceptive control of standing in human infants. *Perception and Psychophysics*, 15, pp. 527-532.
- Lee, D. N. & Lishman, J.R. (1975). Visual proprioceptive control of stance. *Journal of Human Movement Studies*, 1, pp. 87-95.
- Lee, D. N., Lishman, J. R. & Thomson, J.A. (1982). Regulation of Gait in Long Jumping. *Journal of Experimental Psychology*, 8 (3), pp. 448-459.
- Lee, T. D., Blandin, Y. & Proteau, L. (1996). Effect of task instructions and oscillation frequency on bimanual coordination. *Psychological Research*, 59, pp. 100-106.
- Lee, T. D., Swinnen, S. P. & Verschueren, S. (1995). Relative phase alterations during bimanual skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 27, pp. 263-274.
- Lejeune, L., Thouvarecq, R., Anderson, D. I. & Jouen, F. (2004). Kinesthetic estimation of the main orientations from the upright and supine positions. *Acta Psychologica*, 117, pp. 13-28.
- Lejeune, L., Thouvarecq, R., Anderson, D. J., Caston, J. & Jouen, F. (2009). Kinaesthetic and visual perceptions of orientations. *Perception*, 38, pp. 988-1001.
- Lemoigne, J. L. (1999). *La modélisation des systèmes complexes*. : Dunod.
- Leroi-Gourhan, A. (1964). *Le geste et la parole, (Tome 1) technique et langage*. : Sciences d'aujourd'hui Albin Michel.
- Leroy, D., Thouvarecq, R. & Gautier, G. (2008). Postural organisation during cascade juggling: influence of expertise. *Gait & Posture*, 28, pp. 265-270.
- Lestel, D. (1993). Pensée-fourmi, raison pratique et cognition distribuée: le raisonnement complexe comme fait cognitif total. *Studies of Science*, 32 (4), pp. 605-642.
- Lestienne, F. G. & Gurfinkel, V.S. (1988). Postural control in weightlessness: a dual process underlying adaptation to an unusual environment. *Trends in Neurosciences*, 11, pp. 359-363.
- Li, L. & Warren, W.H. (2000). Perception of heading during rotation: Sufficiency of dense motion parallax and reference objects. *Perception Research*, 40, pp. 3873-3894.
- Li, L. & Warren, W.H. (2002). Retinal flow is sufficient for steering during observer rotation. *Psychological Science*, 13, pp. 485-491.
- Lim, H., Ogura, Y. & takanishi, A. (2008). Locomotion pattern generation and mechanisms of a new biped walking machine. *Proceedings of the Royal Society A*, 464, pp. 273-288.
- Lorenz, E. N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 20, pp. 130-141.
- Luria, A. (1995). *Une prodigieuse mémoire (Ré-édition)*. : Seuil, La couleur des idées.
- Luyat, M., Gentaz, E., Corte, T. R. & Guerraz, M. (2001). Reference frames and haptic perception of orientation : body tilt and head tilt effects on the oblique effect. *Perception and psychophysics*, 63, pp. 541-554.
- Luyat, M., Regia-Corte, T. (2009). Les affordances : de James Jerome Gibson aux formalisations récentes du concept. *L'année Psychologique*, 109, pp. 297-332
- Mantel, B., Bardy, B. G. & Stoffregen, T.A. (2005). Intermodal Specification of Egocentric Distance in a Target Reaching Task. In H. Heft & K. L. Marsh (Eds.), *Studies in perception and action XIII*. : Lawrence Erlbaum. pp. 1-4.
- Manto, M. & Oulad Ben Taib, N. (2010). Cerebellar nuclei: key roles for strategically located structures. *Cerebellum*, 9 (1), pp. 17-21.

- Marin, L. & Oullier, L. (2001). When robots fail: The complex processes of learning and development. *Behavioral and Brain Science*, 24, pp. 1033-1050.
- Marin, L., Bardy, B. G. & Bootsma, R.J. (1999). Level of gymnastic skill as an intrinsic constraint on postural coordination. *Journal of Sport Science*, 17, pp. 615-626.
- Marin, L., Bardy, B. G., Baumberger, B., Fluckiger, M. & Stoffregen, T.A. (1999). Interaction between task demands and surface properties in the control of goal-oriented stance. *Human Movement Science*, 18, pp. 31-47.
- Marsh, K. L., Richardson, M. J., Baron, R. M. & Schmidt, R.C. (2006). Contrasting approaches to perceiving and acting with the others. *Ecological psychology*, 18, pp. 1-38.
- Martinez, F. (1977). Les informations auditives permettent-elles d'établir des rapports spatiaux ? Données expérimentales et cliniques chez l'aveugle congénital. *l'Année Psychologique*, 77, pp. 179-204.
- Massion, J. (1984). Postural changes accompanying voluntary movements. Normal and pathological aspects. *Human Neurobiology*, 2, pp. 261-267.
- Massion, J. (1992). Movement, Posture, and equilibrium: interaction and coordination. *Progress in Neurobiology*, 38 (1), pp. 35-56.
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4 (6), pp. 877-887.
- Massion, J. (1997). Cerveau et motricité. : Presses Universitaires de France.
- Massion, J., Amblard, B., Assaiante, C., Mouchnino, L. & Vernazza, S. (1998). Body orientation and control of coordinated movements in microgravity. *Brain Research Review*, 28 (1-2), pp. 83-91.
- Massion, J., Gurfinkel, V., Lipshits, M., Obadia, A. & Popov, K. (1992). [Strategy and synergy: two levels of equilibrium control during movement. Effects of the microgravity]. *Comptes Rendus de L'academie des Sciences. Serie III, Sciences de la Vie*, 314, pp. 87-92.
- Massion, J., Popov, K., Fabre, J. C., Rage, P. & Gurfinkel, V. (1995). Body orientation and center of mass control in microgravity. *Acta Astronautica*, 36 (8-12), pp. 763-769.
- Maynard Smith, J. (2001). La construction du vivant : gènes, embryon et évolution. : .
- Mazoyer, B. (2002). L'imagerie cérébrale fonctionnelle : apports, limites et perspectives. In O. Houdé, B. Mazoyer & N. Tzourio-Mazoyer (Eds.), *Cerveau et psychologie*. : Presses Universitaires de France. pp. 605-609.
- McClelland, J. L. & Rumelhart, D.E. (1986). Parallel distributed processing : explorations in the microstructure of cognition (Vol. II). : Cambridge MIT Press.
- McCloskey, D. I. (1978). Kinesthetic sensibility. *Physiological Review*, 58 (4), pp. 763-820.
- McCollum, G. & Leen, T.K. (1989). Form and exploration of mechanical stability limits in erect stance. *Journal of Motor Behavior*, 21, pp. 225-244.
- Megrot, F., Bardy, B. G. & Dietrich, G. (2002). Dimensionality and the dynamics of human unstable equilibrium. *Journal of Motor Behavior*, 34, pp. 323-328.
- Meijer, O. G. & Roth, K.(. (1988). Advances in Psychology 50. Complex movement Behavior - the motor-action controversy. : Elsevier.
- Memmi, D. (1990). Connexionnisme, intelligence artificielle, et modélisation cognitive. *Intellectica*, 9-10, pp. 41-79.
- Mergner, T. & Rosemeier, T. (1998). Interaction of vestibular, somatosensory and visual signals for postural control and motion perception under terrestrial and microgravity conditions: a conceptual model. *Brain Research Review*, 28 (1-2), pp. 118-135.
- Mergner, T., Huber, W. & Becker, W. (1997). Vestibular-neck interaction and transformation of sensory coordinates. *Journal of vestibular research*, 7 (4), pp. 347-367.
- Merleau-Ponty, M. (1945). Phénoménologie de la perception. : Gallimard.
- Meyer, P. F., Oddson, L. I. & De Luca, C.J. (2004). The role of plantar cutaneous sensation in unperturbed stance. *Experimental Brain research*, 156 (4), pp. 505-512.
- Michaels, C. (1998). The ecological/dynamical approach, manifest destiny and a single movement science. In A. A. Post, J. R. Pijpers, P. Bosh & M. S. J. Boschker (Eds.), . : Print Partners Ipskamp. pp. 65-68.
- Michaels, C. & Beek, P. (1995). The state of ecological psychology. *Ecological Psychology*, 7 (4), pp. 259-278.
- Miller, G., Galanter, E. & Pribram, K. (1960). Plans and structure of the behavior. : .
- Minsky, M. & Papert, S. (1969). Perceptrons. : Cambridge, MIT Press.
- Minvielle, G. & Audiffren, M. (2000). Study of anticipatory postural adjustments in an air pistol-shooting task. *Perceptual and Motor Skills*, 91, pp. 1151-1168.

- Mittelstaedt, H. (1983). A new solution to the problem of the subjective vertical. *Die Naturwissenschaften*, 70, pp. 272-281.
- Mittelstaedt, H. (1995). Evidence of somatic graviception from new and classical investigations. *Acta Otholaryngologica*, 115 (supp. 520), pp. 186-187.
- Mittelstaedt, H. (1996). Somatic graviception. *Biological Psychology*, 42, pp. 53-74.
- Monno, A., Chardenon, A., Temprado, J., Zanone, P. G. & Laurent, M. (2000). Effects of attention on phase transitions between bimanual coordination patterns: a behavioral and cost analysis in humans. *Neuroscience Letters*, 283, pp. 83-96.
- Monno, A., Temprado, J., Zanone, P. G. & Laurent, M. (2002). The interplay of attention and bimanual coordination dynamics. *Acta Psychologica*, 110, pp. 187-211.
- Montagne, G., Cornus, S., Glize, D., Quaine, F. & Laurent, F. (2000). A perception-action coupling type of control in long jumping. *Journal of Motor Behavior*, 32, pp. 37-44.
- Montagne, G., Laurent, M., Durey, A. & Bootsma, R.J. (1999). Movement reversals in ball catching. *Experimental Brain Research*, 129, pp. 87-92.
- Morice, A. H. P., Francois, M., Jacobs, D. M. & Montagne, G. (2010). Environmental constraints modify the way an interceptive action is controlled. *Experimental Brain Research*, , p. DOI 10.1007/s00221-009-2147-0.
- Morin, E. (1982). Science avec conscience. : Fayard.
- Müller, S., Abernethy, B. & Farrow, D. (2006). How do world-class cricket batsmen anticipate a bowler's intention ?. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59 (12), pp. 2162-2186.
- Munzert, J., Lorey, B. & Zentgraf, K. (2009). Cognitive motor processes: the role of motor imagery in the study of motor representation. *Brain Research Review*, 60, pp. 306-326.
- Nashner, L. & Berthoz, A. (1978). Visual contribution to rapid motor responses during postural control. *Brain Research*, 150 (2), pp. 403-407.
- Nashner, L. & McCollum, G. (1985). The organization of human postural movements: a formal basis and experimental synthesis. *Behavioral and Brain Sciences*, 8, pp. 135-172.
- Nashner, L. M., Shupert, C. L., Horak, F. B. & Black, F.O. (1989). Organization of posture controls: An analysis of sensory and mechanical constraints. *Progress in Brain Research*, 80, pp. 395-418.
- Navon, D. (1984). Reresources: a theoretical soup stone?. *Psychological Review*, 91, pp. 216-234.
- Neboit, M. (1983). Evolution de l'exploration visuelle avec l'apprentissage et avec l'expérience professionnelle. *Le Travail Humain*, 46 (1), pp. 33-48.
- Newell, K. (1985). Coordination, control and skill. In D. Goodman, R. B. Wilberg & I. M. Franks (Eds.), *Differing perspectives in motor learning: memory and control*. : Elsevier. pp. 295-317.
- Newell, K. M. (1986). Constraint on the development of coordination. In M. G. Wade & Whiting H T (Eds.), *Motor development in children: aspects of coordination and control*. : Martinus Nijhoff. pp. 341-371.
- Newell, K. M. (1996). Change in movement and skill: learning, retention, and transfer. In M. Latash & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development*. : Lawrence Erlbaum Associates. .
- Newell, K. M. (2003). Schema theory (1975): retrospectives and prospectives. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74 (4), pp. 383-388.
- Newell, K. M. & McDonald, P.V. (1992). Searching for solutions to the coordination function: Learning as exploratory behavior. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorial in motor behavior II*. : Elsevier. pp. 517-532.
- Newell, K. M. & Vaillancourt, D.E. (2001). Dimensional change in motor learning. *Human Movement Science*, 20 (4-5), pp. 695-715.
- Newell, K., Liu, Y. T. & Mayer-Kress, G. (2003). A dynamical systems interpretation of epigenetic landscapes for infant motor development. *Infant Behavior and Development*, 26 (4), pp. 449-472.
- Niveleau, C. (2006). Le concept gibsonien d'affordance: Entre filiation, rupture et reconstruction. *Intellectica*, 43, pp. 159-199.
- Njiokiktjien, C. J. & Van Parys, J.A. (1976). Romberg's sign expressed in a quotient II. Pathology. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie Appliquees Aux Effets De L'agression*, 17, pp. 19-23.
- Norman, D. A. (1999). Affordances, Conventions and Design. *Interactions*, 1.3, pp. 38-42.
- Nougier, V., Stein, J. F. & Bonnel, A.M. (1991). Information processing in sport and "orientation of attention". *International Journal of Sport psychology*, 22, pp. 307-327.
- Nouillot, P. (1998). Caractérisation dynamique d'un mouvement acrobatique. *Science et Motricité*, 32-33, pp. 102-105.

- Nouillot, P. & Natta, F. (2004). Influence of velocity on the human global postural strategies during the movement leading up to the vertical upside-down position. *Neuroscience Letters*, 363, pp. 224-228.
- Nourrit, D., Delignieres, D., Caillou, N., Deschamps, T. & Lauriot, B. (2003). On discontinuities in motor learning: a longitudinal study of complex skill acquisition on a ski simulator. *Journal of Motor Behavior*, 35 (2), pp. 151-170.
- Nyborg, H. & Isaksen, B. (1974). A method for analyzing performances in the RFT. *Scandinavian Journal of Psychology*, 15, pp. 124-126.
- O'Keefe, J. & Nadel, L. (1978). The hippocampus as a cognitive map. : Clarendon Press.
- Ohlmann, T. (1990a). Evocabilité différentielle des référentiels spatiaux, posture et orientation spatiale. In V. Nougier & J. P. Blanchi (Eds.), *Pratiques sportives et modélisation du geste*. : Grenoble Sciences. pp. 215-240.
- Ohlmann, T. (1990b). Les systèmes perceptifs spatiaux vicariants. In M. Reuchlin, C. Lautrey, C. Marendaz & T. Ohlmann (Eds.), *Cognition : l'individuel et l'universel*. : Presses Universitaires de France. pp. 21-58.
- Ohlmann, T. (1990c). La perception de la verticale lors des conflits vision / posture : un exemple de processus vicariants. In M. Reuchlin, C. Lautrey, C. Marendaz & T. Ohlmann (Eds.), *Connaître différemment*. : Presses Universitaires de France. pp. 33-66.
- Ohlmann, T. & Marendaz, C. (1991). Vicarious processes involved in selection / control of frames of reference and spatial aspects of field dependance / independence. In S. Wapner & J. Dernick (Eds.), *Field dependance: cognitive across the life span*. : New Jersey: Publisher Hillsdale. pp. 105-129.
- Oie, K. S., Kiemel, T. & Jeka, J.J. (2001). Human multisensory fusion of vision and touch: detecting non linearity with small changes in the sensory environment. *Neurosciences Letters*, 315 (3), pp. 113-116.
- Oie, K. S., Kiemel, T. & Jeka, J.J. (2002). Multisensory fusion: simultaneous re-weighting of vision and touch for the control of human posture. *Cognitive Brain Research*, 14 (1), pp. 164-176.
- Okubo, J., Watanabe, I. & Baron, J.B. (1980). Study on influences of the plantar mechanoreceptor on body sway. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie Appliquées Aux Effets De L'agression*, 21, pp. 61-69.
- Oltman, P. K. (1968). A portable rod-and-frame apparatus. *Perceptual and Motor Skills*, 26, pp. 503-506.
- Oltman, P. K., Raskin, E. & Witkin, H.A. (1985). Manuel du test des figures encadrées, forme collective. : E.C.P.A..
- Oullier, O., Bardy, B. G., Stoffregen, T. A. & Bootsma, R. (2002). Postural coordination in looking and tracking tasks. *Human Movement Science*, 21, pp. 147-167.
- Oullier, O., Marin, L., Stoffregen, T., Bootsma, R. J. & Bardy, B.G. (2006). Variability in coordination postural dynamics. In K. Davids, S. J. Bennett & K. M. Newell (Eds.), *Movement system variability*. : Champaign: Human kinetics publishers. pp. 25-47.
- Paillard, J. (1971). Les déterminants moteurs de l'organisation de l'espace. *Cahiers de psychologie*, 14 (4), pp. 261-316.
- Paillard, J. (1976). Tonus, posture et mouvement. In C. Kayser (Ed.), *Physiologie, 3ème édition*. : Flammarion. .
- Paillard, J. (1986a). La machine organisée et la machine organisante. In J. Paillard (Ed.), *Pour une psychophysiologie de l'action*. : pp. 89-126.
- Paillard, J. (1986b). Le corps et ses langages d'espace. In J. Paillard (Ed.), *Pour une psychophysiologie de l'action*. : Actio. pp. 153-168.
- Paillard, J. (1986c). L'organisation des habiletés motrices. In J. Paillard (Ed.), *Pour une psychophysiologie de l'action*. : Actio. pp. 31-76.
- Paillard, J. (1986d). L'acte moteur. In J. Paillard (Ed.), *Pour une psychophysiologie de l'action*. : pp. 81-98.
- Paillard, J. (1986e). Les niveaux sensor-moteur et cognitif du contrôle de l'action. In J. Paillard (Ed.), *Pour une psychophysiologie de l'action*. : Actio. pp. 193-206.
- Paillard, J. (1986f). Pour une psychophysiologie de l'action. : Actio.
- Paillard, J. (1990). Les bases nerveuses du contrôle visuo-manuel de l'écriture. In C. Sirat, J. Irigoien & E. Poulle (Eds.), *L'écriture : le cerveau, l'oeil et la main*. : Brepols - Turnhout. pp. 23-52.
- Paillard, T., Costes-Salon, C., Lafont, C. & Dupui, P. (2002). Are there differences in postural regulation according to the level of competition in judoist. *British Journal of Sports Medicine*, 36 (4), pp. 304-305.
- Palut, Y. & Zanone, P. (2005). A dynamical analysis of tennis: Concepts and data. *Journal of Sports Sciences*, 23 (10), pp. 1021-1032.
- Paulignan, Y., Dufosse, M., Hugon, M. & Massion, J. (1989). Acquisition of co-ordination between posture and movement in a bimanual task. *Experimental Brain Research*, 77 (2), pp. 337-348.
- Paulus, W. M., Straube, A. & Brandt, T. (1984). Visual stabilization of posture. Physiological stimulus characteristics and clinical aspects. *Brain : a Journal of Neurology*, 107, pp. 1143-1163.

- Perrin, P., Deviterne, D., Hugel, F. & Perrot, C. (2002). Judo, better than dance, develops sensorimotor adaptabilities involved in balance control. *Gait and Posture*, 15 (2), pp. 187-194.
- Peters, B. T., Haddad, J. M., Heiderscheit, B. C., Van Emmerik, R. E. A. & Hamill, J. (2003). Limitations in the use and interpretation of continuous relative phase. *Journal of Biomechanics*, 36, pp. 271-274.
- Pfeifer, F. & Inoue, H. (2007). Walking: technology and biology. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, pp. 3-9.
- Pillardeau, P. (2003). Pathologie Humaine et évolution ou le syndrome de Lucy. : DERMS.
- Popper, K. (1935). La logique de la découverte scientifique (ré-édition 1995). : Payot.
- Portugali, J. & Haken, H. (1992). Synergetics and Cognitive Maps. *Geoforum; Journal of Physical, Human, and Regional Geosciences*, 23 (2), pp. 111-130.
- Posner, M. (1980). Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, pp. 3-25.
- Posner, M. I. (1978). Chronometric exploration of mind. : L. Erlbaum eds.
- Pozzo, T., Clement, G. & Berthoz, A. (1988). Motor control of a handstand. *Agressologie: Revue Internationale de Physio-Biologie et de Pharmacologie Appliquees Aux Effets De L'agression*, 29 (9), pp. 649-651.
- Prakash, Prabhu, L. V., Saralaya, V. V., Pai, M. M., Ranade, A. V., Singh, G. & Madhyastha, S. (2007). Vertebral body integrity: a review of various anatomical factors involved in the lumbar region. *Osteoporos International*, 18, pp. 891-903.
- Prigogine, I. (1967). Introduction to thermodynamics of irreversible process. : Wiley interscience.
- Prigogine, N. (1992). A la rencontre du complexe. : Presses Universitaires de France.
- Rabin, E., Bortolami, S. B., DiZio, P. & Lackner, J.R. (1982). Haptic stabilization of posture: changes in arm proprioception and cutaneous feedback for different arm orientations. *Journal of Neurophysiology*, 1999, pp. 3541-3549.
- Regan, D. & Hamstra, S. (1993). Dissociation of discrimination thresholds for time to contact and for rate of angular expansion. *Vision Research*, 33, pp. 447-462.
- Reuchlin, M. (1978). Processus vicariants et différences individuelles. *Journal de Psychologie*, 2, pp. 133-145.
- Reuchlin, M. (1997). Psychologie. : Presses Universitaires de France.
- Riccio, G. E. & Stoffregen, T.A. (1990). Gravitoinertial force versus the direction of balance in the perception and control of orientation. *Psychological Review*, 97, pp. 135-137.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L. & Schmidt, R.C. (2005). Effects of Visual and Verbal Interaction on Unintentional Interpersonal Coordination. *Journal of Experimental Psychology*, 31 (1), pp. 62-79.
- Richardson, M. J., Marsh, K. L., Isenhower, R. W., Goodman, J. R. L. & Schmidt, R.C. (2007). Rocking together: Dynamics of intentional and unintentional interpersonal coordination. *Human Movement Science*, 26, pp. 867-891.
- Riley, M. & Turvey, M.T. (2002). Variability and determinism in motor behavior. *Journal of Motor Behavior*, 34 (2), pp. 99-125.
- Riley, M. A. & Clark, S. (2003). Recurrence analysis of human postural sway during the sensory organization test. *Neuroscience Letters*, 342 (1-2), pp. 45-48.
- Riley, M. A., Balasubramaniam, R. & Turvey, M.T. (1999). Recurrence quantification analysis of postural fluctuations. *Gait and Posture*, 9 (1), pp. 65-78.
- Robertson, Caldwell, Hamill, Karen & Whittlesley (2004). Research methods in biomechanics. : Human kinetics publishers.
- Roll, J. (1994). Sensibilités cutanées et musculaires. In M. Richelle, J. Requin & M. Roberts (Eds.), *Traité de psychologie expérimentale*. : Presses Universitaires de France. pp. 483-542.
- Roll, J. P. (2003). Physiologie de la kinestèse. La proprioception : sixième sens ou sens premier ?. *Intellectica*, 36/37, pp. 49-66.
- Roll, J. P. & Vedel, J.P. (1982). Kinaesthetic role of muscle afferent in man, studied by tendon vibration and microneurography. *Experimental Brain Research*, 47(2), pp. 177-190.
- Roll, J. P., Vedel, J. P. & Roll, R. (1989). Eye, head and skeletal muscle spindle feedback in the elaboration of body references. *Progress in Brain Research*, 80, p. 113-23; discussion 57-60.
- Roll, J., Roll, R. & Velay, J. (1991). Proprioception as a link between body space and extra-personal space. In J. Paillard (Ed.), *Brain and space*. : Oxford University Press. pp. 113-132.
- Rosenbaum, D. (2005). The Cinderella of psychology: The neglect of motor control in the science of mental life and behavior. *American Psychologist*, 60 (4), pp. 308-317.

- Rosenbaum, D. & Kornblum, S. (1982). A priming method for investigating the selection of motor response. *Acta Psychologica*, 50, pp. 223-231.
- Roth, K. (1988). Investigations on the basis of generalized motor programme hypothesis. In O. G. Meijer & K. Roth (Eds.), *Advances in psychology 50. Complex movement behavior. The motor action controversy*. : Elsevier Science publisher. pp. 261-288.
- Rougier, P. (2003). Adaptation of control mechanisms involved in upright undisturbed stance maintenance during prolonged darkness. *Neurophysiologie Clinique*, 33 (2), pp. 86-93.
- Rougier, P. & Farenc, I. (2000). Adaptative effects of loss of vision on upright undisturbed stance. *Brain Research*, 871 (2), pp. 165-174.
- Rougier, P., Gelat, T. & Caron, O. (1998). Comparaison des mécanismes de contrôles utilisés pour assurer le maintien d'un appui tendu renversé et d'une station debout. *Revue STAPS*, 46-47, pp. 165-174.
- Runge, C. F., Shupert, C. L., Horak, F. B. & Zajac, F.E. (1999). Ankle and hip postural strategies defined by joint torque. *Gait and Posture*, 10 (2), pp. 161-170.
- Sachs, O. (1988). L'Homme qui prenait sa femme pour un chapeau. : Editions du seuil.
- Saini, M., Kerrigan, D.C., Thirunarayan, M.A. & Duff-Raffaele, M. (1998). The vertical displacement of the center of mass during walking: a comparison of four measurement methods. *Journal of Biomechanical Engineering*, 120, pp. 133-139
- Saltzman, I. J. & Atkinson, R.L. (1954). Comparisons of incidental and intentional learning after different numbers of stimulus presentations. *American Journal of Psychology*, 67, pp. 521-524.
- Sanders, A. F. (1983). Toward a model of stress and human performance. *Acta Psychologica*, 53, pp. 61-97.
- Savelsbergh, G., van der Kamp, J. & Rosengren, K. (2006). Functional variability in perceptual motor development. In K. Davids, S. Bennett & K. Newell (Eds.), *Movement system variability*. : Human Kinetics. pp. 185-197.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, pp. 225-260.
- Schmidt, R. A. (1993). Apprentissage moteur et performance. : Vigot.
- Schmidt, R. A. (2003). Motor schema theory after 27 years: reflections and implications for a new theory. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74 (4), pp. 366-375.
- Schmidt, R. C., Bienvenu, M., Fitzpatrick, P. A. & Amazeen, P.G. (1998). A Comparison of Intra- and Interpersonal Interlimb Coordination: Coordination Breakdowns and Coupling Strength. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24 (3), pp. 854-900.
- Schmidt, R. C., Carello, C. & Turvey, M.T. (1990). Phase transitions and critical fluctuations in the visual coordination of rhythmic movements between people. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, pp. 227-247.
- Schmit, J. M., Regis, D. I. & Riley, M.A. (2005). Dynamic patterns of postural sway in ballet dancers and track athletes. *Experimental Brain Research*, 163 (3), pp. 370-378.
- Schmitz, C., Martin, N. & Assaiante, C. (2002). Building anticipatory postural adjustment during childhood: a kinematic and electromyographic analysis of unloading in children from 4 to 8 years of age. *Experimental Brain Research. Experimentelle Hirnforschung. Experimentation Cerebrale*, 142, pp. 354-364.
- Schoner, G. & Kelso, J.S. (1988). A dynamic theory of behavioral change. *Journal of Theoretical Biology*, 135, pp. 501-524.
- Schoner, G., Zanone, P. G. & Kelso, J.S. (1992). Learning as change of coordination dynamics: Theory and experiment. *Journal of Motor Behavior*, 24, pp. 29-48.
- Searle, J. (1980). Minds, brains and programmes. *Behavioral and Brain Sciences*, 3, pp. 417-457.
- Shaw, R. E., Turvey, M. T. & Mace, W.M. (1981). Ecological Psychology: the consequence of a commitment to realism. In W. Weimer & D. Palermo (Eds.), *Cognition and the symbolic process (II)*. : Lawrence Erlbaum. pp. 159-226.
- Shaw, R., Turvey, M. T. & Mace, W. (1982). Ecological psychology: The consequences of a commitment to realism. In W. Weimer & D. Palermo (Eds.), *Cognition and the symbolic processes II*. : Lawrence Erlbaum. .
- Shepard, R. N. & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three dimensional objects. *Science*, 171, pp. 701-703.
- Sherrington, C. S. (1906). On the proprioceptive system, especially in its reflex aspect. *Brain : a Journal of Neurology*, 29, pp. 467-482.
- Sherwood, D. E. & Lee, T.D. (2003). Schema theory: critical review and implications for the role of cognition in a new theory of motor learning. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74 (4), pp. 376-382.

- Simoneau, G. G., Ulbrecht, J. S., Derr, J. A. & Cavanagh, P.R. (1995). Role of somatosensory input in the control of human posture. *Gait and Posture*, 3, pp. 115-122.
- Skinner, B. F. (1979 (1974 pour l'édition américaine)). Pour une science du comportement : le behaviorisme. : Delachaux & Niestlé.
- Slobounov, S. & Newell, K.M. (1996). Postural dynamics in upright and inverted stances. *Journal of Applied Biomechanics*, 12, pp. 185-196.
- Smart, J. L. J., Mobley, B. S., Otten, E. W., Smith, D. L. & Amin, M.R. (2004). Not just standing there: The use of postural coordination to aid visual tasks. *Human Movement Science*, 22 (6), pp. 769-780.
- Smethurst, C. J. & Carson, R.G. (2001). The acquisition of movement skills practice enhances the dynamic stability of bimanual coordination. *Human Movement Science*, 20, pp. 499-529.
- Sparrow, W. H. & Newell, K.M. (1998). Metabolic energy expenditure and the regulation of movement economy. *Psychonomic Bulletin and Review*, 5, pp. 173-196.
- Spivey, M. (2007). The continuity of mind. : Oxford University Press.
- Squire, L. R. (1987). Memory and brain. : Oxford university Press.
- Stoffregen, T. & Riccio, G.E. (1988). An Ecological Theory of Orientation and the Vestibular System. *Psychological Review*, 95 (1), pp. 3-14.
- Stoffregen, T. A. (1985). Flow structure versus retinal location in the optical control of stance. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 11 (5), pp. 554-565.
- Stoffregen, T. A. (1986). The role of optical velocity in the control of stance. *Perception and Psychophysics*, 39 (5), pp. 355-360.
- Stoffregen, T. A. (2003). Affordances as properties of the animal-environment system. *Ecological Psychology*, 15 (2), pp. 115-134.
- Stoffregen, T. A. & Bardy, B.G. (2001). On specification and the senses. *Behavioral and Brain Sciences*, 24 (2), pp. 213-261.
- Stoffregen, T. A., Adolph, K., Thelen, E., Gorday, K. M. & Sheng, Y.Y. (1997). Toddlers' postural adaptations to different support surfaces. *Motor Control*, 1, pp. 119-137.
- Stoffregen, T. A., Chen, F., Yu, Y. & Villard, S. (2009). Stance width and angle at sea: effects of sea state and body orientation. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 80, pp. 845-849.
- Stoffregen, T. A., Faugloire, E., Yoshida, K. & Flanagan, M.B. (2008). Motion sickness and postural sway in console video games.. *Human Factors*, 50 (2), pp. 322-331.
- Stoffregen, T. A., Hove, P., Schmit, J. & Bardy, B.G. (2006). Voluntary and involuntary postural responses to imposed optic flow. *Motor Control*, 10, pp. 24-33.
- Stoffregen, T. A., Pagulayan, R. J., Bardy, B. G. & Hettinger, L.J. (2000). Modulating postural control to facilitate visual performance. *Human Movement Science*, 19, pp. 203-220.
- Stoffregen, T. A., Smart, L. J., Bardy, B. G. & Pagulayan, R.J. (1999). Postural stabilisation of looking. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, pp. 1641-1658.
- Stoffregen, T. A., Villard, S., Kim, C., Ito, K. & Bardy, B.G. (2009). Coupling of head and body movement with motion of the audible environment. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 35, pp. 1221-1231.
- Stoffregen, T., Hove, P., Bardy, B., Riley, M. & Bonnet, C. (2007). Postural stabilization of perceptual but not cognitive performance. *Journal of Motor Behavior*, 39 (2), pp. 126-138.
- Swinnen, S. P., Lee, T. D., Verschueren, S., Serrien, D. J. & Bogaerds, H. (1997). Interlimb coordination: Learning and transfer under different feedback conditions. *Human Movement Science*, 16, pp. 749-785.
- Teasdale, N., Bard, C., LaRue, J. & Fleury, M. (1993). On the cognitive peetrability of postural control. *Experimental Aging Research*, 19, pp. 1-13.
- Temprado, J. (2010). Apprentissage moteur : quel usage des connaissances scientifiques ?. *EPS*, 340, pp. 6-9.
- Temprado, J. & Montagne, G. (2001). Les coordinations pezrceptivo-motrices. : Armand Colin.
- Temprado, J., Della-Grasta, M., Farell, M. & Laurent, M. (1997). A novice-expert comparison of (Intra-limb) coordination subserving the volley ball serve. *Human Movement Science*, 16, pp. 653-676.
- Temprado, J., Zanone, P. G., Monno, A. & Laurent, M. (1999). Attentional load associated with performing and stabilizing preferred bimanual patterns. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Perfomance*, 25 (6), pp. 1579-1594.

- Temprado, J., Zanone, P. G., Monno, A. & Laurent, M. (2001). A dynamical framework to understand performance traded-off and interference in dual tasks. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27 (6), pp. 1303-1313.
- Thelen, E. (1983). Learning to walk is still an "old" problem : a reply to Zelazo (1983). *Journal of Motor Behavior*, 15(2), pp. 139-161.
- Thelen, E. (1985). Development origins of motor coordination: leg movements in human infants. *Developmental Psychobiology*, 18, pp. 1-22.
- Thelen, E. (1995). Motor development: a new synthesis. *American Psychologist*, 50, pp. 79-95.
- Thelen, E. & Smith, L.B. (2001). A dynamic systems approach to the development of cognition and action. : M.I.T Press.
- Thelen, E. & Spencer, J.P. (1998). Postural control during reaching in young infants: a dynamic systems approach. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 22, pp. 507-514.
- Theureau, J. (2004). Le cours d'action : la méthode élémentaire. : Octares.
- Theureau, J. (2006). Le cours d'action : méthode développée. : Octares.
- Theureau, J. (2008). Le cours d'action : méthode réfléchie. : Octares.
- Thoumie, P. & Do, M.C. (1996). Changes in motor activity and biomechanics during balance recovery following cutaneous and muscular deafferentation. *Experimental Brain Research*, 110 (2), pp. 289-297.
- Thouvarecq, R., Caston, J. & Protais, P. (2007). Cholinergic system, rearing environment and trajectory learning during aging in mice. *Physiology and Behavior*, 90, pp. 155-164.
- Thouvarecq, R., Protais, P., Jouen, F. & Caston, J. (2001). Influence of cholinergic system on motor learning during aging in mice. *Behavioural Brain Research*, 118, pp. 209-218.
- Tognoli, E. & Kelso, J.S. (2009). Brain cognition dynamics : true and false phase of synchrony and metastability. *Progress in Neurobiology*, 87, pp. 31-40.
- Tsang, P. S., Velasquez, V. L. & Vidulich, M.A. (1996). Viability of resource theories in explaining time-sharing performance. *Acta Psychologica*, 91, pp. 175-202.
- Turvey, M. T. (1977). Preliminaries to a theory of action with reference to vision. In R. Shaw & G. Bransford (Eds.), *Perceiving, Acting and Knowing: toward an ecological psychology*. : Lawrence Erlbaum. .
- Turvey, M. T. (1981). Ecological laws of perceiving and acting : in reply to fodor and Pylyshyn. *Cognition*, 9, pp. 237-304.
- Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American Psychologist*, 45 (8), pp. 938-953.
- Turvey, M. T. (1992). Affordances and prospective control: An outline of the ontology. *Ecological Psychology*, 4, pp. 173-187.
- Turvey, M. T. & Carello, C. (1996). Dynamics of bernstein 's level of synergies. In M. Latash & M. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development*. : Lawrence Erlbaum. .
- Turvey, M. T., Rosenblum, L. D., Schmidt, R. C. & Kugler, P. (1986). Fluctuations and Phase Symmetry in Coordinated Rhythmic Movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12 (4), pp. 564-583.
- Turvey, M. T., Schmidt, R. C., Rosenbaum, L. D. & Kugler, P.N. (1988). On the time allometry of coordinated rhythmic movement. *Journal of Theoretical Biology*, 130, pp. 285-325.
- van der Fits, I., Klip, A. W., van Eykern, L. & Hadders-Algra, M. (1998). Postural adjustments accompanying fast pointing movements in standing, sitting and lying adults. *Experimental Brain Research*, 120 (2), pp. 202-216.
- Van Der Kooij, H., Jacobs, R., Koopman, B. & Grootenboer, H. (1999). A multisensory integration model of human stance control. *Biological Cybernetics*, 80, pp. 299-308.
- Van der Linden, M. & Bruyer, P. (1991). Neuropsychologie de la mémoire humaine. : Presses Universitaires de Grenoble.
- Varela, F. (1988). Invitation aux sciences cognitives. : Editions du Seuil.
- Varela, F. (1989). Autonomie et connaissance. : Editions du Seuil.
- Varela, F. (1999). Present-time consciousness. *Journal of consciousness studies*, 6 (2-3), pp. 111-140.
- Varela, F., Thompson, E. & Rosch, E. (1993). L'inscription corporelle de l'esprit. : Seuil.
- Vereijken, B., Whiting, H. T. & Beek, P. (1992). A dynamical systems approach to skill acquisition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 45, pp. 323-344.
- Villard, S. J., Flanagan, M. B., Albanese, G. M. & Stoffregen, T.A. (2008). Postural instability and motion sickness in a virtual moving room. *Human Factors*, 50 (2), pp. 332-345.

- von Hofsten, C., Vishton, P., Spelke, E., Feng, Q. & Rosander, K. (1998). Predictive action in infancy: tracking and reaching for moving objects.. *Cognition*, 67 (3), pp. 255-285.
- von Holst, E. (1954). Relations between the central nervous system and the peripheral organs. *British Journal of Animal Behavior*, 2, pp. 89-94.
- von Holst, E. (1969). Relative coordination as a phenomenon and as a method of analysis of central nervous system (1939). In , *Selected Papers of Erich von Holst: The Behavioural Physiology of Animals and Man, London. : Methuen.* pp. 33-135.
- von Holst, E. & Mittelstaedt, H. (1969). The reafference principle. Interaction between the central nervous system and the periphery (1950). In , *Selected Papers of Erich von Holst: The Behavioural Physiology of Animals and Man, London. : Methuen.* pp. 139-173.
- Vuillerme, N. & Nougier, V. (2003). Effect of light finger touch on postural sway after lower limb muscular fatigue. *Brain Research Bulletin*, 84 (10), pp. 1560-1563.
- Vuillerme, N. & Nougier, V. (2004). Attentional demand for regulating postural sway: the effect of expertise in gymnastics. *Brain Research Bulletin*, 63 (2), pp. 161-165.
- Vuillerme, N. & Pinsault, N. (2007). Re-weighting of somatosensory inputs from the foot and the ankle for controlling posture during quiet standing following trunk extensor muscles fatigue.. *Experimental Brain Research*, 183, pp. 323-327.
- Vuillerme, N., Danion, F., Forestier, N. & Nougier, V. (2002). Postural sway under muscle vibration and muscle fatigue in human: effects of changes in sensory inputs. *Neuroscience Letters*, 333 (2), pp. 131-135.
- Vuillerme, N., Danion, F., Marin, L., Boyadjian, A., Prieur, J. & Weise, I. (2001). The effect of expertise in gymnastics on postural control. *Neuroscience Letters*, 303, pp. 83-86.
- Wagman, J. B. (2010). What is responsible for the emergence of order and pattern in psychological systems ?. *Journal of Theoretical and Philosophical Psychology*, 30 (1), pp. 32-50.
- Wagman, J. B. & Carello, C. (2003). Haptically creating affordances: The user-tool interface. *Journal of experimental Psychology: Applied*, 9 (3), pp. 175-186.
- Wallon, H. (2002). Les origines du caractère chez l'enfant. : Boisvin, Paris (1934) Rééd PUF Quadrige.
- Wang, Y. C. & Frost, B.J. (1992). Time to collision is signaled by neurons in the nucleus rotundus of pigeons . *Nature*, 356, pp. 236-238.
- Warren, W. H. (1984). Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 10, pp. 683-703.
- Warren, W. H. (1986). Visual control of step length during running over irregular terrain. (1986). *Journal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 12, pp. 259-266.
- Warren, W. H. (1988). action modes and laws of control for the visual guidance of action. In O. G. Meijer & K. Roth (Eds.), *Complex movement behaviour: The motor-action controversy. : North Holland.* pp. 339-380.
- Warren, W. H. (1998). Visually controlled locomotion: 40 years later.. *Ecological Psychology*, 10, pp. 177-219.
- Warren, W. H. & Whang, S. (1987). Visual guidance of walking through apertures: Body-scaled information for affordances. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, pp. 371-383.
- Warren, W. H. & Yaffe, D.M. (1989). Dynamics of step length adjustment during running: a comment on patla, robinson, samways, and amstrong (1989). *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 15, pp. 618-623.
- Warren, W. H., Kay, B. A. & Yilmaz, E. H. (1996). Visual control of posture during walking: functional specificity, control human walking. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 22, pp. 818-838.
- Warren, W. H., Kay, B. A., Zosh, W. D., Duchon, A. P. & Sahuc, S. (2001). Optic flow is used to control human walking. *Nature Neuroscience*, 4 (2), pp. 213-216.
- Warren, W. H., Young, D. S. & Lee, D.N. (1986). Visual control of step length during running over irregular terrain. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 12, pp. 259-266.
- Watson, J. B. (1930). Behaviorism. : Norton, New York.
- Weaver, W. & Shannon, C.E. (1975). Théorie mathématique de la communication. : Les classiques des sciences humaines. La bibliothèque du CEPL.
- Webb, B. (2001). Can robots make good models of biological behaviour?. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, pp. 1033-1050.
- Welford, A. T. (1977). La charge mentale de travail comme fonction des exigences de la capacité, de la stratégie et de l'habileté . *Le Travail Humain*, 40 (2), pp. 283-304.
- Wenderoth, N., Bock, O. & Krohn, R. (2002). Learning a new bimanual coordination pattern is influenced by existing attractors. *Motor Control*, 6, pp. 166-182.

- Wiesendanger, M. (1981). The pyramidal tract. Its structure and function. In Towe A L & E. Luschei (Eds.), *Handbook of behavioral neurology*. : Plenum Press. pp. 401-491.
- Williams, A. M. & Grant, A. (1999). Training perceptual skill in sport. *International Journal of sports psychology*, 30 (2), pp. 194-220.
- Williams, M. & Ward, P. (2003). Perceptual expertise: development in sports. In J. L. Starkes & K. A. Ericsson (Eds.), *Expert performance in sports: advance in research on sport expertise*. : Champaign, Human Kinetics. pp. 219-250.
- Williams, M. A. & Ericsson, K.A. (2005). Perceptual-cognitive expertise in sport: Some considerations when applying the expert performance approach . *Human Movement Science*, 24, pp. 283-307.
- Williams, M., Davids, K. & Williams, J.G. (1999). visual perception and action in sport. : E&FN Spon.
- Williams, M., Hodges, N., North, J. & Barton, G. (2006). Perceiving patterns of play in dynamic sport task: investigating the essential information underlying skilled performance. *Perception*, 35, pp. 317-332.
- Witkin, H. A. (1950). Individual differences in ease of perception of embedded figures. *Journal of Personality*, 19, pp. 1-15.
- Witkin, H. A., Dyk, R. B., Faterson, H. F., Goodenough, D. P. & Karp, S.A. (1962). Psychological differentiation. : Wiley.
- Witkin, H. A., Lewis, H. B., Hertzman, M., Machover, K., Meissner, B. P. & Wapner, S. (1954). Personality through perception. : Harper & Brothers.
- Woollacott, M. & Shumway-Cook, A. (2002). Attention and the control of posture and gait: a review of an emerging area of research. *Gait & Posture*, 16, pp. 1-14.
- Woollacott, M. H. & Shumway-Cook, A. (1990). Changes in posture control across the life span: a systems approach.. *Physical Therapy*, 70, pp. 799-807.
- Yang, J. F., Winter, D. A. & Wells, R.P. (1990). Postural dynamics in the standing human. *Biological Cybernetics*, 62, pp. 309-320.
- Zanone, P. G. & Kelso, J.S. (1992a). Learning and transfer as dynamical paradigms for behavioural change. In G. E. Stelmach & J. Requin (Eds.), *Tutorial in motor Behavior*. : . pp. 517-532.
- Zanone, P. G. & Kelso, J.S. (1992b). Evolution of behavioral attractors with learning: nonequilibrium phase transitions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18 (2), pp. 403-421.
- Zanone, P. G. & Kelso, J.S. (1997). Coordination dynamics of learning and transfer: Collective and component levels.. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23 (5), pp. 1454-1480.
- Zelazo, P. R. (1983). The development of walking: new findings and old assumptions. *Journal of Motor Behavior*, 15 (2), pp. 99-137.
- Zoccolotti, P., Antonucci, G. & Spinelli, D. (1993). The gap between rod and frame influences the rod-and-frame effect with small and large inducing displays.. *Perception and psychophysics*, 54, pp. 14-19.
- Zwirn, H. (2006). Les systèmes complexes. : Odile Jacob.