

**ESPACE DU GESTE
ET DE LA POSTURE**



Pôle « Modélisation en Sciences cognitives et sociales »

Sommaire

F. THULLIER, F.-G. LESTIENNE, <i>Introduction</i>	7
J.-L. PETIT, <i>Repousser les limites du corps</i>	9
J.-P. ROLL, R. ROLL, <i>Arguments neurobiologiques à l'appui de la notion de schéma corporel</i>	31
B. PAVARD, P. SALEMBIER & F. DECORTIS, <i>Ingénierie cognitive & ergonomie</i>	43
M. ZABALIA, <i>Rôle de l'action dans le développement de la représentation mentale de l'espace</i>	59
N. BENNIS, S. JACOBS & A. ROBY BRAMI, <i>L'orientation de la main pour la préhension dépend de la direction du mouvement d'approche</i>	73
C. LENAY, O. GAPENNE & J. STEWART, <i>Perception spatiale prothétisée : outils d'étude de la localisation et de la reconnaissance de formes</i>	85
F. DOSSEVILLE & J. LA RUE, <i>Tempo spontané moteur et fréquence gestuelle</i>	103
J. JEAN, M. CADOPI & L. DELCOR, <i>Expertise et mémoire de travail en danse étude du rappel de séquences de mouvements</i>	121
Y. KERLIRZIN, G. DIETRICH & S. VIEILLEDENT, <i>Rôle de la cinématique et de la dynamique dans la forme de la trajectoire : l'exemple du soulever de charge</i>	133
J.-M. LEGRAS, <i>La projection du corps dans l'espace dans l'émergence de nouvelles gestuelles</i>	155
F. MEGROT, G. DIETRICH, G. KERLIRZIN, S. VIEILLEDENT, <i>Stratégies de maintien d'un équilibre dynamique : stabilisation d'un segment corporel ou du centre de masse ?</i>	171
O. OULLIER, B. BARDY, R. BOOTSMA & T. STOFFREGEN, <i>L'émergence des états posturaux et de leurs changements</i>	187

INTRODUCTION

THULLIER F. & LESTIENNE F.-G *

Le premier colloque pluridisciplinaire « Espace du Geste et de la Posture » qui s'est tenu à l'Université de Caen le 10 et 11 avril 2000, faisait suite aux journées thématiques sur la « modélisation de l'espace »¹ organisées en 1999 par le pôle pluridisciplinaire ModeSCoS « Modélisation en Sciences Cognitives et Sociales », composante de la Maison de la Recherche en Sciences Humaines de l'Université de Caen.

Ce colloque a été une occasion privilégiée de rassembler, autour du thème du traitement et de l'utilisation de l'espace, des philosophes, psychologues, linguistes, neuroscientistes, cognitivistes sans oublier les roboticiens et les biomécaniciens.

Néanmoins, de cette approche pluridisciplinaire peut émerger une réelle difficulté : la pluridisciplinarité, quand elle est mal maîtrisée, amènerait trop souvent à plaquer de manière abusive des concepts issus d'une discipline sur une autre, conduisant ainsi à vider de tout contenu ses concepts et à appauvrir les paradigmes internes à chaque discipline.

C'est en quelque sorte ce défi que nous avons tenté de relever en proposant, à travers ce premier colloque pluridisciplinaire « *Espace du Geste et de la Posture* » un débat entre ce champ disciplinaire qu'est la biomécanique et les axes de recherche appartenant au domaine des sciences humaines et des neurosciences.

L'objectif de ce colloque a été de favoriser les échanges entre ces disciplines afin de faire converger les moyens d'étude sur l'engagement corporel dans l'espace, qu'il soit objectif ou virtuel.

Nous avons dans cet ouvrage extrait de l'ensemble des communications (plus d'une centaine) les exposés répondant à notre prudente démarche consistant à rechercher non pas la confrontation entre disciplines mais au contraire à rendre compte de la richesse de cette rencontre. Par cette sélection nous avons voulu donner un éclairage sur l'apport de la

* Laboratoire de neurosciences de l'homme en mouvement, EA 2131, PPF ModeSCoS, MRSH, UMS CNRS 843, Université de Caen Basse-Normandie, France.

1. Voir l'article « L'orientation du mouvement et de la posture dans l'espace tridimensionnel » par Lestienne F.-G., et Thullier F. dans le n° 30 (pp. 35-44) des Cahiers de la Maison de la Recherche en Sciences Humaines (2002).

biomécanique dans cette approche de *l'espace du geste et de la posture* qui est par nature pluridisciplinaire, tant il est vrai que la complexité de cet objet réclame la mise en commun d'angles d'approche complémentaires en s'évertuant à briser la barrière sémantique. Tâche délicate, qui a nécessité au cours de la rédaction de l'ouvrage des rapprochements inter-disciplinaires qui trouvent un écho dans les échanges pluridisciplinaires du Pôle ModeSCoS autour de deux de ses séminaires réguliers : « *Capture et Analyse du Regard* » et « *Approches Pluridisciplinaires du Mouvement Humain et de la Pratique Sportive* ».

L'ouvrage comporte douze contributions originales qui ont été regroupées en quatre chapitres. Le premier aborde *la notion d'espace : de l'approche philosophique à l'ingénierie cognitive*. Cette question est abordée sous l'angle de la philosophie de l'action par Jean Luc Petit, de la neurobiologie par Jean Pierre Roll & Régine Roll et de ingénierie cognitive par Bernard Pavard et al. Le second est une approche de *la perception et la représentation de l'espace*. Contribuent à ce chapitre un psychologue -Marc Zabalia-, des neurophysiologistes -Nezh Bennis et al-. et des cognitivistes de la perception -Charles Lenay et al.-. Le troisième s'adresse à *l'espace du geste et de la posture : une illustration dans le domaine de l'activité physique et sportive*. Ce champ de réflexion est illustré par quatre travaux expérimentaux issus du domaine des habiletés physiques : Fabrice Dosseville et al., Julie Jean et al., Yves. Kerlirzin et al. et Jean Michel Legras. Enfin Fabrice Mégrot et al., et Olivier Ouiller, appartenant à des centres de recherche en Sciences du Sport entament le quatrième et dernier chapitre qui traite de *l'Espace et de l'orientation postural*.

L'ÉMERGENCE DES ÉTATS POSTURAUX ET DE LEURS CHANGEMENTS

*Olivier OULLIER **
*Benoît G. BARDY ***
*Reinoud J. BOOTSMA ****
*Thomas A. STOFFREGEN *****

L'émergence des états posturaux et de leur changements

Qu'il soit debout, assis ou encore allongé, l'homme adopte au quotidien un grand nombre d'attitudes qui sont autant d'états posturaux. A titre d'exemple, le seul fait de s'asseoir sur une chaise correspond à un enchaînement de plusieurs états posturaux. Les actions que nous effectuons soudainement, sans préparation spécifique, nous semblent être le fruit d'automatismes simples. Qui n'a jamais observé la facilité et la rapidité avec laquelle un surfeur des neiges contrôle son équilibre au cours d'une descente ou encore une gymnaste parvenant à maintenir son équilibre sur une poutre alors que la chute semblait inéluctable un instant auparavant ? Quelles que soient ses actions et leurs finalités, l'être humain effectue quotidiennement des mouvements posturaux impliqués dans le contrôle de son équilibre.

Ces actions motrices, bien qu'aisées en apparence, mettent en jeu des mécanismes complexes car deux problèmes principaux se posent au bipède humain :

- 1) coordonner les différentes parties du système postural et,
- 2) coordonner le système postural avec les actions à effectuer. C'est ce double processus de coordination que nous discutons dans cet

* *Center for Complex Systems and Brain Sciences, Florida Atlantic University, 777 Glades road, Boca Raton, FL 33431, USA.*

voice: + 1 561 297 2354

fax: + 1 561 297 3634

e-mail : oullier@ccs.fau.edu

website: <http://oullier.free.fr>

** *Centre de Recherche en Sciences du Sport, Université de Paris XI, Orsay, France.*

*** *UMR " Mouvement et Perception ", Université de la Méditerranée-CNRS, Marseille, France.*

**** *Human Factors Research Laboratory, University of Minnesota, Minneapolis, USA.*

article. Après une revue critique des travaux existant sur le contrôle de l'équilibre érigé après perturbation, nous confronterons les explications théoriques qui en découlent aux résultats issus de deux expériences que nous avons récemment menées, dans le but de comprendre les mécanismes qui sous-tendent les transitions entre les différents états posturaux.

Equilibre, posture et coordination

Comme tous les phénomènes observables, et ce quelle que soit l'échelle de description choisie, les mouvements posturaux sont le résultat d'interactions entre les différents composants du système postural. Afin de pouvoir comprendre les changements d'états qui surviennent lorsque nous effectuons une action, il convient d'analyser les relations entre l'équilibre et la posture, ainsi que la manière dont les différents segments du système postural sont coordonnés entre eux.

D'un point de vue mécanique, un corps est en équilibre (statique) lorsque la somme des forces appliquées à son centre de masse est nulle. Pour que l'homme érigé soit en équilibre, il faut que l'axe passant par son centre de masse et son centre des pressions soit aligné avec le vecteur-force gravito-inertiel. Lorsqu'un membre est mis en mouvement, il crée un moment de rotation. Le vecteur centre de masse-centre des pressions et le vecteur gravito-inertiel ne sont alors plus alignés. Il y a perte de l'équilibre érigé. C'est par l'application de forces sur la surface de support que le centre de masse peut être maintenu au dessus des appuis (Bouisset, 1991).

Le système postural de l'homme érigé se caractérise par des oscillations permanentes autour de la direction de l'équilibre gravito-inertiel (Yoneda & Tokumasu, 1986). Pour que ces oscillations n'engendrent pas un déséquilibre, les mouvements des différents segments du système postural doivent donc être coordonnés entre eux. D'après Massion (1997), la posture assure deux fonctions essentielles :

- 1) une fonction de soutien anti-gravitaire, qui consiste à lutter contre les forces gravito-inertielles et,
- 2) une fonction d'interface avec le monde extérieur qui permet d'orienter les segments corporels par rapport à l'environnement. La posture joue dès lors un rôle primordial dans l'organisation et la réalisation de nos mouvements.

Les coordinations posturales : un problème de réduction dimensionnelle

La coordination est conçue par Bernstein (1967) comme un processus de maîtrise du très grand nombre de degrés de liberté prenant part à un mouvement particulier. Le corps humain étant constitué d'une multitude de muscles et d'articulations, il semble impossible de contrôler toutes les combinaisons offertes par un tel système. Dès lors, la réduction du nombre de degrés de liberté du système apparaît comme une condition nécessaire au maintien de l'équilibre et au contrôle postural.

Si la nécessité d'une réduction des degrés de liberté posturaux est aujourd'hui largement acceptée, les explications théoriques relatives aux solutions mises en œuvre diffèrent. Pour Nashner et ses collaborateurs (e.g. Nashner, 1976 ; Nashner & McCollum, 1985), la solution réside dans l'utilisation de synergies neuromusculaires. Ces auteurs proposent de réduire le nombre infini de combinaisons entre les différents muscles et articulations qui interviennent dans le maintien de la posture érigée à quelques schèmes neuromusculaires préférentiels ou *stratégies posturales*. Comme nous le verrons ci-dessous, dans cette perspective, les stratégies posturales et le passage de l'une à l'autre seraient le fruit d'une programmation motrice centrale.

A l'inverse, pour Bardy et ses collaborateurs (Bardy & Marin, 1997 ; Bardy, Marin, Stoffregen, & Bootsma, 1999 ; Marin, 1998, Oullier, 2001), les états posturaux et leurs changements ne doivent pas être considérés comme le résultat d'une prescription motrice détaillée, mais comme la conséquence des propriétés d'auto-organisation du système postural. L'étude de la dynamique intrinsèque du système postural représente une alternative à celle des mécanismes de programmation motrice pour expliquer l'origine des coordinations. Le comportement, dans cette perspective, émerge des interactions entre le corps humain et un ensemble de contraintes.

L'approche neuromusculaire des changements posturaux

L'école de Nashner (Nashner, 1976 ; Nashner & McCollum, 1985 ; McCollum & Leen, 1989) propose de réduire la multitude de combinaisons articulaires et musculaires à des stratégies posturales discrètes sélectionnées par le système nerveux central. Ces stratégies sont issues d'un nombre limité de synergies pré-programmées et ont pour but de ramener le corps humain à l'équilibre suite à une perturbation.

Dans la stratégie *cheville*, le sujet se comporte comme un pendule inversé, oscillant d'avant en arrière autour de l'axe des chevilles par activation des muscles adéquats. Lors des études expérimentales, les mouvements des hanches sont considérés comme négligeables. Au cours de la stratégie *hanche*, la position du centre de masse du sujet est affectée par la rotation du tronc autour de l'axe pelvien, le mouvement des chevilles étant quasiment nul.

Ces stratégies hanche et cheville définissent des états posturaux. Le sujet peut toutefois passer de l'une à l'autre si la situation à laquelle il est confronté le nécessite. Le but des changements de stratégie est identique à celui des stratégies elles-mêmes : ramener le corps à l'équilibre érigé (Nashner & McCollum, 1985). Pour Horak et Moore (1993), le changement survient en fonction de l'accélération du centre de masse nécessaire pour rétablir l'équilibre. Ces auteurs ajoutent qu'un changement similaire intervient si l'on diminue la surface de support, ou si le sujet qui se penche en avant atteint les limites de l'équilibre érigé. D'un point de vue musculaire, le changement a alors pour but de minimiser l'activation musculaire nécessaire pour accélérer le centre de masse en fonction des contraintes biomécaniques (Horak & Moore, 1993). L'expérience joue un rôle aussi important que les *feed-backs* proprioceptifs dans les changements posturaux puisque tous deux permettent d'anticiper les modifications, par exemple, des propriétés de la surface de support (Horak & Nashner, 1986).

D'après Nashner et McCollum (1985), ce changement d'une stratégie à une autre n'est pas direct. Sur prescription du contrôleur central, le système postural glisse d'une stratégie pure (hanche ou cheville) à une autre en passant par des stratégies intermédiaires appelées stratégies mixtes qui sont des combinaisons de stratégies hanche et cheville. Quand le sujet produit une combinaison de stratégies, celles-ci ne sont pas simplement superposées mais réarrangées en un nombre limité de combinaisons (Nashner & McCollum, 1985). Ces stratégies mixtes sont adoptées lorsque le système passe de manière graduelle d'une stratégie dite " pure " (hanche ou cheville) à une autre (Horak & Moore, 1993). Le caractère graduel des transitions entre les états posturaux est expliqué par l'adoption de stratégies mixtes (Horak & Nashner, 1986 ; McCollum & Leen, 1989 ; Horak & Moore, 1993).

Quel(s) niveau(x) d'analyse utiliser pour décrire les transitions posturales ?

Les stratégies neuromusculaires proposées par Nashner et ses collaborateurs permettent de réduire le nombre de degrés de liberté du système postural. Toutefois, leur pertinence pour comprendre les

mécanismes sous-tendant les coordinations posturales pose deux problèmes majeurs.

Le premier problème se situe au niveau de la définition même des stratégies neuromusculaires qui sont définies à plusieurs niveaux. Elles le sont au niveau cinétique (les forces et leurs moments), cinématique (les mouvements des segments du corps), neural (la programmation centrale des actions motrices) et musculaire (les synergies agonistes et antagonistes). Pour Nashner et McCollum (1985), ces niveaux de description sont équivalents. Par exemple, à une définition cinétique de la stratégie hanche (appelée aussi *stratégie de cisaillement*) correspond une seule définition cinématique (une inclinaison du haut du corps sur le bas du corps) ou musculaire (une contraction concentrique de la sangle abdominale). Or, nous savons depuis Bernstein (1967) qu'il n'existe pas de correspondance directe et univoque entre ces niveaux. Certains paraissent en effet plus appropriés que d'autres à l'étude du mouvement. Le niveau musculaire, par exemple, semble ne pas suffire pour analyser les coordinations posturales puisque l'on peut produire différents mouvements avec la même activité musculaire (Turvey, Fitch, & Tuller, 1982) ou qu'une même trajectoire cinématique peut être générée par deux patrons musculaires différents (Bonnard, Pailhous, & Danion, 1997). De même, le seul niveau cinétique nous semble limité car il est possible d'obtenir les mêmes conséquences mécaniques à partir de mouvements différents (Riccio & Stoffregen, 1988). C'est pourquoi il nous semble plus judicieux de travailler sur le niveau cinématique qui est le niveau auquel le mouvement, et par conséquent les coordinations posturales, sont observables.

Le deuxième problème est lié aux changements posturaux. Pour Horak et Moore (1993), les changements de stratégies s'expliquent à l'aide d'un modèle prédictif. Ils suggèrent que les contraintes biomécaniques et l'optimisation des activations musculaires dictent un changement graduel d'une stratégie à une autre. Dans cette approche, les transitions entre les différents états posturaux sont la conséquence de changements de programmes moteurs effectués par le contrôleur central. C'est le système nerveux qui prédit l'action à venir et qui anticipe en changeant de stratégie. Ceci implique une connaissance exhaustive de toutes les situations auxquelles le système postural peut être confronté. Se pose dès lors un problème pragmatique dans la mesure où le système nerveux ne peut connaître, a priori, toutes ces situations. De plus, le stockage en mémoire nécessaire au fonctionnement d'un tel système est également problématique. La topologie changeante de l'espace postural, à cause notamment des mouvements oscillatoires du corps humain, ainsi qu'une absence de relation directe et univoque entre les niveaux d'analyse, implique que le stockage de

la synergie au cours de tous les mouvements semble une hypothèse fonctionnellement peu viable.

Une alternative : la théorie des systèmes dynamiques appliquée à la posture

Afin d'essayer de résoudre les problèmes évoqués ci-dessus, Bardy et ses collaborateurs ont donc proposé une alternative dynamique pour étudier les coordinations posturales (Bardy et al., 1999). Plutôt que d'envisager un contrôle prescriptif des états posturaux, l'accent est mis sur les propriétés d'auto-organisation du système postural, et le caractère émergent des coordinations. Les propriétés d'auto-organisation s'expriment par l'apparition à un niveau macroscopique (celui du mouvement) d'un nombre limité de patrons de coordination sous l'effet conjoint de contraintes à un niveau microscopique. Nous pouvons distinguer trois types de contraintes :

- 1) les contraintes intentionnelles (relatives à la tâche),
- 2) les contraintes environnementales (relatives à la surface de support ou à la gravité),
- 3) les contraintes intrinsèques (relatives aux propriétés du sujet telles que la hauteur du centre de gravité ou la longueur des pieds). Les contraintes agissent sur un système qui a des tendances préférentielles et vont sculpter le mouvement (Kelso, 1995). Les effets de ces trois types de contraintes sur les coordinations posturales ont fait l'objet d'études récentes (Marin, 1998 ; Bardy et al., 1999 ; Marin, Bardy, & Bootsma, 1999 ; Oullier, Bardy, Stoffregen, & Bootsma, 2002 ; 2004). Ces études ont proposé d'étudier les coordinations posturales à partir des relations de phase entre les mouvements des hanches et ceux des chevilles. En effet, les mouvements des hanches et des chevilles peuvent être caractérisés par leurs angles de phase respectifs : ϕ_{hanche} et ϕ_{cheville} . A partir de ces deux descripteurs individuels, il est possible de considérer leur relation de phase, i.e. leur phase relative $\phi_{\text{rel}} = \phi_{\text{cheville-hanche}}$. Dans le cadre de la théorie des systèmes dynamiques, une telle variable collective est appelée *paramètre d'ordre* puisqu'elle permet à tout moment de connaître l'état organisationnel du système (Haken, Kelso & Bunz, 1985 ; Kelso, 1995).

Des changements qualitatifs sont généralement associés à la formation spontanée de patrons spatiaux ou temporels ordonnés. Les patrons qui émergent sont définis en termes d'attracteurs pour ces variables collectives dynamiques. Un attracteur est un sous-ensemble de l'espace des états vers

lequel le système considéré converge au cours du temps. Ainsi, des trajectoires indépendantes ayant des conditions initiales différentes convergent vers une certaine limite ou attracteur. Des études sur les transitions de modes de coordination d'un point de vue dynamique ont montré que deux modes de coordination apparaissent régulièrement : un mode en phase ($\phi_{rel} = 0^\circ$) et un mode anti-phase ($\phi_{rel} = 180^\circ$). Ces deux modes de coordination sont considérés comme des attracteurs stables pour les coordinations inter-segmentaires (Kelso, Scholz, & Schöner, 1986 ; Schöner & Kelso, 1988) ou intra-segmentaires (Buchanan, Kelso, & de Guzman, 1997 ; Diedrich & Warren, 1995). Bardy et al. (1999) ont montré la pertinence de ϕ_{rel} pour l'étude des coordinations posturales. A travers la manipulation des contraintes qui influencent la coordination (la tâche, les propriétés de la surface de support, la hauteur du centre de gravité du sujet), les auteurs ont mis en évidence l'existence de deux états posturaux stables dans une tâche supra-posturale de poursuite de cible intentionnelle. Ils ont montré l'émergence d'un mode de coordination pour lequel les articulations des chevilles et des hanches se déplacent *en phase* ($\phi_{rel} = 0^\circ$) et un mode pour lequel les articulations se déplacent *en anti-phase* ($\phi_{rel} = 180^\circ$) lorsque les sujets devaient osciller en phase avec la cible tout en maintenant la distance cible-tête constante.

D'autre part, des changements posturaux d'un mode en phase vers un mode anti-phase ont également été mis en évidence sous l'influence mutuelle des trois contraintes précédemment citées (Marin, Bardy, Baumberger, Flückiger, & Stoffregen, 1999). Ces travaux étaient toutefois centrés principalement sur l'existence de deux états stables qui permettent de caractériser la coordination et ne nous apportent que peu d'éléments pour comprendre la nature des changements entre ces états. Une analyse fine des transitions posturales est présentée dans la suite de cet article.

Ce travail est également nécessaire car il subsiste une ambiguïté concernant le passage d'un état postural à un autre. Pour Horak et Moore (1993), ce passage se fait de manière graduelle, par l'adoption de stratégies mixtes intermédiaires prescrites par le contrôleur central. Dans l'approche dynamique, les transitions entre les états sont soudaines et brusques. Ces transitions brutales entre deux attracteurs sont une indication des capacités d'auto-organisation du système étudié. Sous l'effet des différentes contraintes, un mode de coordination devient instable. Cette perte de stabilité produit une réorganisation rapide, sous l'effet des contraintes agissant sur des éléments microscopiques qui composent le système postural. Ce système passe alors d'un état d'ordre (mode en phase) à un autre état d'ordre (mode anti-phase).

Les changements de coordination posturale comme des transitions entre attracteurs non-linéaires

Après avoir envisagé les modes de coordination posturale comme des attracteurs non-linéaires, nous nous sommes penchés sur la question du passage d'un mode de coordination à un autre. Comme nous venons de le voir dans les paragraphes précédents, le comportement dynamique du système que nous étudions, le système postural, peut-être résumé par les valeurs successives de ϕ_n . La stabilité de chaque état est représentée par la profondeur du puits formé par une fonction potentiel. Cette profondeur traduit la puissance de l'attracteur. Chaque puits représente un mode de coordination posturale. Une augmentation de la valeur du paramètre de contrôle modifie la symétrie du potentiel et conduit aux caractéristiques suivantes :

- 1) l'existence de deux états stables ;
- 2) une augmentation de la variabilité d'un paramètre d'ordre culminant dans des fluctuations critiques qui traduisent la perte de stabilité et annoncent le changement ;
- 3) en général, quand le paramètre de contrôle change de manière continue, une fois une valeur critique atteinte, le système peut changer qualitativement et de manière discontinue. Il s'agit du moment où l'on passe d'un mode organisationnel à un autre. Il y a alors bifurcation d'un mode de coordination posturale à un autre,
- 4) Un phénomène d'hysteresis peut être observé, c'est-à-dire la sensibilité du système à son histoire. L'effet d'hysteresis se traduit par un retour retardé du nouvel état adopté au précédent lors de la diminution continue de la valeur du paramètre de contrôle,
- 5) La dernière signature est le ralentissement critique qui est observé au voisinage de la transition lorsque le système est perturbé. Moins l'état adopté est stable, plus il faudra de temps au système pour revenir à son état initial après perturbation.

Etude expérimentale des transitions posturales

Nous allons maintenant discuter les résultats de deux expériences menées récemment. Nous présentons tout d'abord le modèle théorique qui nous a permis de formuler les hypothèses de chacune des expériences. Ce cadre de référence est relatif, d'une part, aux caractéristiques inhérentes aux systèmes dynamiques et, d'autre part, aux caractéristiques propres au système postural. Nous poursuivrons par une analyse des résultats et de

leurs conséquences au regard des théories neuromusculaire et dynamique des changements posturaux. Cela nous amènera aux perspectives offertes par cette étude tant au niveau de ses applications au sein des activités physiques et sportives qu'à celui de ses conséquences théoriques et pratiques.

Dans un premier temps, nous avons testé les sujets dans une tâche intentionnelle de poursuite de cible, suivant un mouvement antéro-postérieur, afin d'observer les transitions entre les différents modes de coordination posturale. Le système postural était alors soumis à l'augmentation continue d'un *paramètre de contrôle* (la fréquence d'oscillation de la cible à suivre) dans le but de tester l'existence et la stabilité des attracteurs posturaux. Notre hypothèse était que les transitions de phase surviennent quand un attracteur devient instable et que le système bifurque vers un nouvel attracteur. Nous avons dès lors cherché à mettre en évidence les quatre signatures des transitions entre attracteurs (Turvey, 1990 ; Diedrich & Warren, 1995), c'est-à-dire :

- 1) la présence d'au moins deux attracteurs stables définis par des états différents du paramètre d'ordre ;
- 2) si le paramètre de contrôle est augmenté, une bifurcation doit intervenir ;
- 3) au voisinage de cette bifurcation, le système doit perdre sa stabilité. Cette perte de stabilité se traduit par des fluctuations critiques i.e. une augmentation de la variabilité du paramètre d'ordre ;
- 4) enfin, la tendance du système à rester dans l'état qui est le sien, donc à retarder la transition, i.e. un phénomène d'hysteresis.

Dans une deuxième expérience nous avons approfondi l'étude de la stabilité des états posturaux. Nous avons analysé le temps de relaxation du système postural qui, à l'inverse des fluctuations critiques, ne dépend pas d'un facteur stochastique. Il s'agit du temps que met le système pour revenir à son état stable initial après avoir été perturbé (Turvey, 1990). Nous avons formulé l'hypothèse que plus le système est instable, i.e. proche de la bifurcation, plus il mettra de temps à se rétablir. On parle de ralentissement critique (Scholz, Kelso, & Schöner, 1987). L'analyse du temps de relaxation permet de montrer la perte de stabilité du système postural au voisinage de la transition et, plus généralement, la stabilité, au sens dynamique du terme, des attracteurs sous-jacents.

La dynamique des transitions posturales

Attracteurs posturaux

Un premier résultat saillant a émergé de ces deux expériences : la présence de deux états posturaux. A l'instar des études récentes menées dans ce domaine (Bardy et al., 1999) et de celles menées sur les coordinations bimanuelles (Haken et al., 1985 ; Schöner & Kelso, 1988) ou locomotrices (Diedrich & Warren, 1995, 1998), nous avons mis au jour deux modes préférés de coordination posturale : un mode en phase ($\phi_{rel} \approx 20^\circ$) et un mode anti-phase ($\phi_{rel} \approx 180^\circ$). Soulignons cependant que ces modes en phase et anti-phase différaient légèrement des patrons présents dans les études sur les coordinations bimanuelles (Haken et al., 1985 ; Kelso et al., 1986). Si l'intervalle de confiance contenait la valeur 180° , la valeur de ϕ_{rel} la plus répandue dans la littérature, pour le mode anti-phase, il n'en fut pas de même pour le mode en phase. Dans ce cas en effet, la valeur 0° n'était pas comprise dans l'intervalle de confiance. La valeur moyenne de ϕ_{rel} pour le mode en phase était de 21° (Bardy, Oullier, Bootsma & Stoffregen, 2002). Deux interprétations sont possibles pour expliquer cet écart de ϕ_{rel} par rapport à 0° . La première est relative à la nature du couplage entre les deux oscillateurs. Dans les études habituelles sur les coordinations (e.g., Haken et al., 1985 ; Schöner & Kelso, 1988), ce couplage est soit informationnel soit neural, mais les oscillateurs sont généralement mécaniquement indépendants l'un de l'autre. Le système postural, en revanche, est composé d'oscillateurs qui sont mécaniquement (inertiellement) couplés entre eux : les mouvements du haut du corps ont un effet mécanique sur ceux du bas du corps, et réciproquement. Ce couplage inertiel pourrait conduire le système postural à osciller de manière spontanée avec le décalage de phase observé. La seconde hypothèse est liée à la fréquence même de nos oscillateurs. De nouveau, dans les études classiques portant sur les transitions, les oscillateurs (e.g., les doigts) ont des fréquences naturelles identiques qui favorisent un couplage en phase. La manipulation de la différence de fréquence entre les deux oscillateurs (e.g., Turvey, Roseblum, Schmidt, & Kugler, 1986) conduit généralement à une déviation de la phase relative de sa valeur initiale. En ce qui concerne le système postural, la dissymétrie de longueur, d'inertie et de sa distribution, qui existe entre le haut et le bas du corps, et qui implique des fréquences d'oscillations différentes, pourrait conduire à un mode de couplage naturellement décalé de 0° .

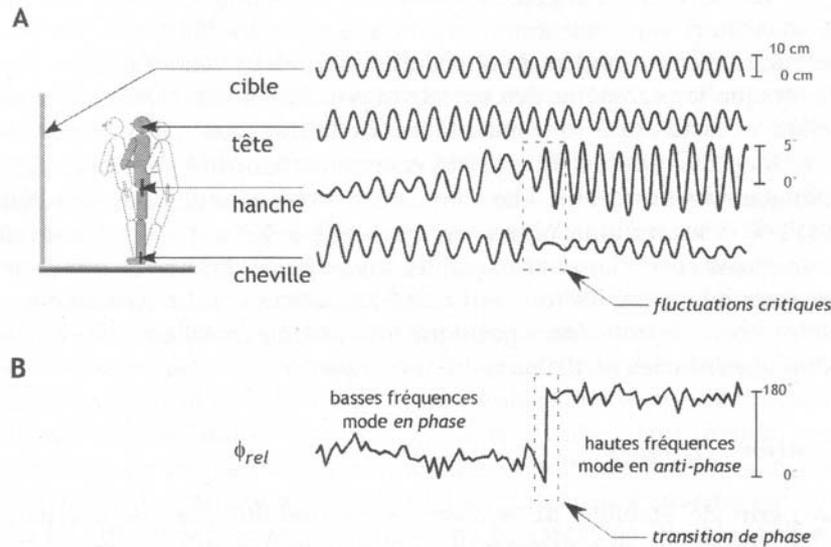


Figure 1 : A) Zoom sur les signaux de la cible, de la tête, de la hanche et de la cheville autour de la transition d'un mode de coordination posturale en phase à un mode en anti-phase. B) Phase relative cheville-hanche ϕ_{rel} calculée à partir des signaux de la figure 1A (d'après Bardy et al., 2002).

Bifurcation

La deuxième caractéristique que nous avons mise en évidence est le caractère brutal et soudain de la transition qui survenait entre ces deux états (Figure 1). La bifurcation est un changement qualitatif de la phase relative cheville-hanche, ϕ_{rel} , c'est-à-dire du paramètre d'ordre de la coordination, suite à un changement quantitatif du paramètre de contrôle, ici la fréquence d'oscillation de la cible. Les données individuelles, et l'étude de la durée de la bifurcation ont permis de montrer le caractère brutal de la transition qui survient entre les deux états. Nous avons observé de grandes différences entre les sujets au niveau de la fréquence à laquelle intervenait la transition (Oullier, Bardy, Bootsma & Stoffregen, 1999). La brève durée de bifurcation (1.4 cycles en moyenne) et la distribution de fréquence ont montré que 80 % des bifurcations avaient lieu dans une durée d'un cycle. Cette bifurcation intervenant après perte de stabilité du système, correspond à une transition d'un mode en phase vers un mode anti-phase lorsque le paramètre de

contrôle est accru et inversement lorsqu'il est diminué. Cette transition revêt donc la forme d'un changement entre une dynamique mono-stable (un point-attracteur) vers une autre dynamique mono-stable (un autre point-attracteur), avec une région de bi-stabilité marginale. Cette dernière région existe lorsque le paramètre de contrôle atteint une valeur particulière pour laquelle les fluctuations sont maximales. Cette transition de type nœud-col (Kelso, Ding & Schöner, 1992) semble, encore une fois, adéquate pour décrire les changements posturaux. Elle contraste avec les formalisations de Haken et al. (1985) et les résultats obtenus par Schöner & Kelso (1988), qui révèlent des transitions entre des états bi-stables (deux points attracteurs, 0° et 180°) et des états mono-stables (un seul point attracteur, 0°). La dynamique des transitions semble donc être spécifique au système considéré et à la nature du couplage entre les oscillateurs qui le composent.

Fluctuations critiques

La perte de stabilité du système s'est traduite par les fluctuations critiques survenant au voisinage de la transition. Les fluctuations critiques sont notre troisième caractéristique dynamique et s'expriment à travers la variabilité de la phase relative, faible au début, et augmentant progressivement à l'approche de la transition, pour atteindre son maximum dans la région de transition, et diminuer brutalement après la bifurcation (Bardy et al., 2002).

Hysteresis

La quatrième caractéristique est la présence de l'effet d'hysteresis, i.e. de la sensibilité du système à son histoire. Nous avons trouvé un effet d'hysteresis dans plus de 80 % des essais analysés (Bardy & al, en révision). Là encore, ces résultats diffèrent de ceux généralement obtenus dans la littérature sur les coordinations inter- ou intra-segmentaires (e.g., Haken et al., 1985) qui montrent la puissance de l'attracteur en phase par rapport à l'attracteur anti-phase. Dans ces études, en effet, l'augmentation progressive de la fréquence d'oscillation produit une bifurcation du mode en phase vers le mode anti-phase. En revanche, la diminution de cette fréquence ne produit pas de bifurcation du mode anti-phase vers le mode en phase. En ce qui concerne le système postural, les deux modes de coordination semblent constituer des attracteurs également stables.

Stabilité

Selon Gibson (1966) : “ *La station debout n'est utile que si elle est stable* ”. Riccio et Stoffregen (1988) définissent la stabilité comme l'état à l'intérieur duquel les mouvements non contrôlés sont minimisés. La stabilité posturale n'implique donc pas forcément l'absence de mouvement. Un mouvement est stable quand il résiste fortement à une perturbation. Cette stabilité est généralement définie en termes de tendance ou de propension de réponse d'un système à des entrées. Il est fréquemment fait référence à la résistance d'un système au changement. La stabilité peut ainsi être envisagée à travers le comportement du système, sa réponse ou son action. C'est donc à travers les changements qui s'opèrent, tout comme les changements subis, que l'on peut envisager la notion de stabilité. Au cours de la deuxième expérience, nous avons testé la stabilité du système à travers son temps de relaxation, la dernière caractéristique dynamique, suite à une perturbation visuelle inattendue. De manière inopportune, la trajectoire de la cible subissait un changement de trajectoire de 180°. Notre hypothèse, fréquemment vérifiée dans la littérature sur les coordinations bimanuelles (Scholz, Schöner & Kelso, 1987) était que l'on observerait une augmentation du temps de relaxation au voisinage de la transition. Elle a été corroborée par les résultats qui ont montré très clairement cette augmentation (Bardy et al., 2002).

Transitions posturales vs. stratégies intermédiaires

Les résultats obtenus dans cette étude sont compatibles avec les transitions entre attracteurs, et plus généralement avec les postulats de l'approche dynamique. Par rapport aux travaux de Nashner et ses collaborateurs (e.g., Nashner & McCollum, 1985 ; Horak & Nashner, 1986), les résultats obtenus offrent de nouvelles directions pour comprendre les états posturaux et leurs changements. Le résultat en effet le plus marquant est sans doute la nature de la transition. En étudiant la réaction posturale de sujets placés sur une plate-forme mobile, Nashner et ses collaborateurs (e.g., Horak & Moore, 1993) ont suggéré l'existence de stratégies intermédiaires, dites stratégies mixtes, comme des passages obligés entre les stratégies hanche et cheville. Ces stratégies mixtes sont caractérisées par une réorganisation des synergies musculaires, et cette réorganisation est graduelle (Horak & Nashner, 1986). Dans la tâche que nous avons étudiée, nos résultats indiquent à l'inverse une transition rapide, et l'absence de mode de coordination intermédiaire. Le changement est soudain et brutal tel que le prévoit la théorie. Sous l'effet des contraintes liées à la tâche (la fréquence d'oscillation de la cible), un mode de coordination perd sa stabilité

au bénéfice d'un autre. La tâche utilisée peut être à l'origine de ces différences. En effet, la tâche la plus répandue dans la littérature est la plateforme oscillante qui induit une perturbation posturale mécanique. Nous avons proposé une tâche de perturbation visuelle de la posture. Il est également possible que la réorganisation des synergies proposées par Nashner pour décrire les stratégies mixtes corresponde à la perte de stabilité du système postural que nous avons observée.

Cette étude avait pour objectif d'analyser les changements posturaux. En considérant les modes posturaux comme des coordinations émergentes, les travaux de Bardy et collaborateurs (e.g., Bardy et al., 1999 ; Marin et al., 1999 ; Oullier et al., 2002 ; 2004) ont permis d'analyser les états posturaux sous l'angle de leur dynamique. Les outils offerts par l'approche dynamique nous ont permis ici d'appréhender les transitions entre ces états. Les résultats obtenus par Bardy et al. (2002), i.e., la présence de deux états également stables, d'une bifurcation entre ces états, d'une augmentation des fluctuations au voisinage de la transition, et du phénomène d'hysteresis, nous encourageant à poursuivre dans cette voie. Trois aspects peuvent être développés.

Le premier est l'analyse détaillée de la stabilité de ces deux attracteurs. Une étude fine du temps de relaxation, après perturbation visuelle ou mécanique située à une proximité plus ou moins grande de la région de transition, a permis de déterminer et de quantifier précisément la stabilité de ces attracteurs posturaux.

Le deuxième est relatif à l'expertise sportive. Il est classique d'affirmer que l'expertise est, pour une part, le résultat de la maîtrise des multiples degrés de liberté du corps (Bernstein, 1967). En comparant des gymnastes experts et novices, Marin, Bardy et Bootsma (1999) ont récemment montré que le changement d'un état postural à l'autre dépendait de la maîtrise de ces degrés de liberté. Les experts étaient en effet capables, soit spontanément, soit par consigne, de retarder la transition d'un mode en phase vers un mode anti-phase. La manipulation fine du niveau et du type d'expertise (gymnastes, skieurs, nageurs) permettra d'étudier le rôle de cette expertise comme contrainte supplémentaire sur la coordination posturale. La diversité de l'expertise permet d'étudier les conséquences de la rigidité corporelle due aux contraintes du sport (e.g., gymnastique) et donc de manipuler la raideur du système postural.

Enfin, nous aimerions revenir sur l'idée de modes intermédiaires. Les résultats obtenus dans ce travail suggèrent, en tout cas pour la tâche étudiée, l'absence de coordination intermédiaire entre le mode en phase et le mode anti-phase. Ces données semblent en contradiction avec celles de Horak et

Moore (1993) et de Horak et Nahsner (1986). En manipulant les propriétés intentionnelles (la tâche), intrinsèques (les propriétés mécaniques du corps) et environnementales (la surface de support), nous proposons de contraindre les sujets à adopter un mode de coordination intermédiaire (e.g., 60° de phase relative). Cette manipulation a permis d'étudier en détails les caractéristiques de ces états posturaux intermédiaires, notamment leur stabilité, et d'en analyser les effets sur les modes voisins. Prises ensemble, ces propositions expérimentales pourraient permettre de mieux connaître les caractéristiques du paysage dynamique sous-tendant les coordinations posturales chez l'homme. Elles orientent aussi les recherches vers les liens potentiels qui existent entre le couplage intrinsèque (modes de coordinations posturales) et le couplage visuel (interface avec l'environnement) (Oullier, Bardy, & Bootsma, 2001 ; Oullier et al. 2002 ; 2004).

Remerciements

Les expériences présentées dans cet article ont été réalisées au sein de l'UMR " Mouvement et Perception " (Université de la Méditerranée-CNRS) et du Laboratoire de Stabilité Posturale (Université de Cincinnati). Les auteurs remercient le Ministère de l'Education Nationale, de la Recherche et de la Technologie, ainsi que la National Science Foundation pour le financement de ces travaux de recherche ainsi que Ludovic Marin, Audrey Di Caro et Erwann Michel-Kerjan pour leur aide.

Correspondance

Olivier Oullier
Center for Complex Systems and Brain Sciences, Florida Atlantic
University,
777 Glades Road, Boca Raton, FL 33431, USA.
e-mail : oullier@ccs.fau.edu internet : <http://oullier.free.fr>
tel : + 1 561 297 2354 fax : + 1 561 297 3634.

Bibliographie

BARDY B.-G., & MARIN L., 1997, Pour une approche fonctionnelle des coordinations posturales. In M. Lacour (Ed.), *Posture et équilibre : pathologies, vieillissement, stratégies, modélisation*. Sauramps

- Medical, Montpellier, pp. 139-154.
- 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, p. 1284-1301.
- BARDY B.-G., OULLIER O., BOOTSMA R.-J., & STOFFREGEN T.-A., 2002, The dynamics of human postural transitions. *Journal of Experimental Psychology : Human perception and Performance*, 28, p. 499-514.
- BERNSTEIN N.-A., 1967, *The co-ordination and regulation of movement*. Pergamon, London.
- BONNARD M., PAILHOUS J., & DANION F., 1997, Intentional on-line adaptation of rhythmic movements during a hyper- to microgravity change. *Motor Control*, 1, p. 247-262.
- BOUISSET S., 1991, Relation entre support postural et mouvement intentionnel : approche biomécanique. *Archives Internationales de Physiologie, de Biochimie et de Biophysique*, 99, A77-A92.
- BUCHANAN J.-J., KELSO J.-A.-S., & GUZMAN G.-C., 1997, Self-organization of trajectory formation : I. Experimental evidence. *Biological Cybernetics*, 76, p. 257-273.
- 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, p. 183-202.
- DIEDRICH F.-J., & WARREN W.-H., 1998, The dynamics of gait transitions : effects of grade and load. *Journal of Motor Behavior*, 1, p. 60-78.
- GIBSON J.-J., 1966, *The senses considered as perceptual systems*. Boston : Houghton Mifflin.
- HAKEN H., KELSO J.-A.-S., & BUNZ H., 1985, A theoretical model of phase transitions in human movements. *Biological Cybernetics*, 51, p. 347-356.
- HORAK F.-B., & MOORE S.-P., 1993, The effect of prior learning on human postural responses. *Gait and Posture*, 1, p. 203-210.
- HORAK F.-B., & NASHNER L.-M., 1986, Central programming of postural movements : Adaptation to altered support surface configurations. *Journal of Neurophysiology*, 55, p. 1369-1381.
- KELSO J.-A.-S., 1995, *Dynamic patterns*. The MIT Press, London.
- KELSO J.-A.-S., DING M., & SCHÖNER G., 1992, Dynamic pattern formation : A primer. In A. Baskin et J. Mittenthal (Eds.), *Principles of organization*

- in organisms, Santa Fe Institute Addison-Wesley, Santa Fe, p. 397-439
- KELSO J.-A.-S., SCHOLZ J.-P., & SCHÖNER G., 1986, Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion : Critical fluctuations. *Physics Letters A*, 118, p. 279-284.
- MARIN L., 1998, Une approche émergente des coordinations posturales. Thèse de Doctorat en STAPS, Université de la Méditerranée, Marseille, France.
- MARIN L., BARDY B.-G., BAUMBERGER B., FLÜCKIGER M., & STOFFREGEN T.-A., 1999, Interaction between task demands and surface properties in the control of goal-oriented stance. *Human Movement Science*, 18, p. 31-47.
- MARIN L., BARDY B.-G., & BOOTSMA R.-J., 1999, Level of gymnastic skill as an intrinsic constraint on postural coordination. *Journal of Sport Sciences*, 17, p. 615-626.
- MASSION J., 1997, *Cerveau et motricité*. Presses universitaires de France, Paris.
- McCOLLUM G., & LEEN T.-K., 1989, Form and exploration of mechanical stability limits in erect stance. *Journal of Motor Behavior*, 21, p. 225-244.
- NASHNER L.-M., 1976, Fixed patterns of rapid postural responses among leg muscles during stance. *Experimental Brain Research*, 30, p. 13-24.
- NASHNER L.-M., & McCOLLUM G., 1985, The organization of postural movements : A formal basis and experimental synthesis. *The Behavioral and Brain Sciences*, 8, p. 135-172.
- OULLIER O., 2001, *Auto-organisation des coordinations posturales*. Thèse de doctorat en Sciences du Mouvement Humain, Université de la Méditerranée, Marseille, France.
- OULLIER O., BARDY B.-G., & BOOTSMA R.-J., 2001, Intrinsic and informational coupling in stance. In G. Button et C. Carello (Eds.) *Studies in Perception and Action VI*. Lawrence Erlbaum, Hillsdale. Lawrence Erlbaum Associates, Mahaw, p. 169-172.
- OULLIER O., BARDY B.-G., BOOTSMA R.-J., & STOFFREGEN T.-A., 1999, On the dynamical nature of human postural transitions. In M.-A. Grealy, & J.-A. Thomson (Eds.), *Studies in Perception and Action V*. Lawrence Erlbaum Associates, Mahaw, p. 330-333.
- OULLIER O., BARDY B.-G., STOFFREGEN T.-A., & BOOTSMA R.-J., 2002, Postural coordinations in looking and tracking tasks. *Human Movement*

- Science, 21, p. 147-167
- OULLIER O., BARDY B.-G., STOFFREGEN T.-A., & BOOTSMA R.-J., 2004, Task-specific stabilization of postural coordination during stance on a beam. *Motor Control, sous presse.*
- RICCIO G.-E., & STOFFREGEN T.-A., 1988, Affordances as constraints on the control of stance. *Human Movement Science, 7*, p. 265-300.
- SCHOLZ J.-P., KELSO J.-A.-S., & SCHÖNER G., 1987, Nonequilibrium phase transitions in coordinated biological motion : Critical slowing down and switching time. *Physics Letters A, 123*, p. 390-394.
- SCHÖNER G., & KELSO J.-A.-S., 1988, Asynergetic theory of environmentally-specified and learned patterns of movement coordination. I : Relative phase dynamics. *Biological Cybernetics, 58*, p. 71-80.
- TURVEY M.-T., 1990, Coordination. *American Psychologist, 45*, p. 938-953.
- TURVEY M.-T., FITCH H.-L., & TULLER B., 1982, The Bernstein perspectives : I. the problems of degrees of freedom and context - coordination variability. In J.-A. S. Kelso (Ed.), *Human motor behavior*. Lawrence Erlbaum Associated, Mahwah, p. 239-252.
- TURVEY M.-T., ROSEMBLUM L.-D., SCHMIDT R.-C., & KUGLER P.-N., 1986, Fluctuations and phase symmetry in coordinated rhythmic movements. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance, 12*, p. 564-583.
- YONEDA S., & TOKUMASU K., 1986, Frequency analysis of body sway in the upright posture. *Acta Otolaryngology, 102*, p. 87-92.

« *Espace du geste
et de la posture* »

- F. THULLIER, F.-G. LESTIENNE, *Introduction*
J.-L. PETIT, *Repousser les limites du corps*
J.-P. ROLL, R. ROLL, *Arguments neurobiologiques à l'appui de la notion de schéma corporel*
B. PAVARD, P. SALEMBIER & F. DECORTIS, *Ingénierie cognitive & ergonomie*
M. ZABALIA, *Rôle de l'action dans le développement de la représentation mentale de l'espace*
N. BENNIS, S. JACOBS & A. ROBY BRAMI, *L'orientation de la main pour la préhension dépend de la direction du mouvement d'approche*
C. LENAY, O. GAPENNE & J. STEWART, *Perception spatiale prothésisée : outils d'étude de la localisation et de la reconnaissance de formes*
F. DOSSEVILLE & J. LA RUE, *Tempo spontané moteur et fréquence gestuelle*
J. JEAN, M. CADOPI & L. DELCOR, *Expertise et mémoire de travail en danse étude du rappel de séquences de mouvements*
Y. KERLIRZIN, G. DIETRICH & S. VIEILLEDENT, *Rôle de la cinématique et de la dynamique dans la forme de la trajectoire : l'exemple du soulever de charge*
J.-M. LEGRAS, *La projection du corps dans l'espace dans l'émergence de nouvelles gestuelles*
F. MEGROT, G. DIETRICH, G. KERLIRZIN, S. VIEILLEDENT, *Stratégies de maintien d'un équilibre dynamique : stabilisation d'un segment corporel ou du centre de masse ?*
O. OULLIER, B. BARDY, R. BOOTSMA & T. STOFFREGEN, *L'émergence des états posturaux et de leurs changements*

Prix de vente TTC : 15 €

ISSN 1250-6419

