

MÉMOIRES ORIGINAUX

*Laboratoire PsyCLE, Université de Provence (1)
Laboratoire de Psychologie
et Neurosciences de la Cognition,
Université de Rouen (2)¹*

CONNAISSANCE DU CONTEXTE ET ANTICIPATION POSTURALE CHEZ L'ENFANT AU COURS DU DÉVELOPPEMENT

Marianne JOVER (1), Daniel MELLIER (2)

SUMMARY : Influence of knowledge in postural anticipation in children during development

This article examines research on the development of anticipatory postural adjustment (APA). We present first a definition of APA in which we differentiate anticipation of events depending whether there are internal (self induced) or external. Studies on the development of APA centered on anticipation of self-inflicted postural destabilization show a progressive integration, in the feed-forward control of posture, of postural perturbations associated to the movement. The development of postural anticipation of an external event requires the subject to know the event's characteristics (for example, the weight of an object to catch). The development of this anticipation during childhood raises several hypotheses about the links between knowledge of context and postural anticipation.

Key words : postural anticipation, development, feed forward control, object's representation.

1. Centre de Recherche en Psychologie de la Connaissance, du Langage et de l'Émotion (PsyCLE), Université de Provence, 29, avenue R.-Schuman, F-13621 Aix-en-Provence Cedex. Adresse e-mail : jover@up.univ-aix.fr.

Le corps doit concilier deux objectifs antagonistes pour exécuter une action. Il doit d'une part agir, c'est-à-dire mobiliser les segments corporels nécessaires à l'exécution de l'action ; d'autre part, il doit stabiliser sa position pour que le geste n'entraîne pas de déséquilibre. L'action comprend donc un soutien postural intimement associé au mouvement volontaire. Hess (1943) a formalisé ce principe en définissant les composantes téléocinétique (mouvement) et éréismatique (soutien) de l'action.

Le profond enchevêtrement de ces deux éléments est responsable du fait que le contrôle de la posture est un facteur déterminant du développement des actions motrices (Bertenthal et von Hofsten, 1998). En outre, tout comme le contrôle proactif du mouvement détermine la finesse et la qualité du geste, le contrôle anticipé de la posture est, lui aussi, un facteur fondamental d'adaptation (von Hofsten, 1993). Cet article propose une revue de littérature sur l'ajustement postural anticipé (APA) et son développement. Il défend l'idée que l'intégration des connaissances du sujet dans l'organisation de cet ajustement constitue une perspective de recherche encore peu explorée et particulièrement prometteuse, sur laquelle il apporte des données développementales entre 20 et 40 mois.

1. ENTRE MOUVEMENT ET POSTURE : L'AJUSTEMENT POSTURAL ANTICIPÉ

PROPRIÉTÉS DE L'AJUSTEMENT POSTURAL ANTICIPÉ

La posture est définie par les relations générales mécaniques existant entre les différentes parties du corps, autrement dit par la position des segments entre eux et par rapport à la gravité, à un moment donné (Gahery, 1987). Elle détermine la manière dont l'organisme affronte les stimulations du monde extérieur, se prépare à y réagir et fournit un cadre de référence pour percevoir, agir et interagir avec l'environnement. Le contrôle postural est ainsi fondamental à la fois pour stabiliser et orienter le corps, avant, durant et après les actions (Paillard, 1971, 1976 ; Massion, 1994).

Lorsqu'une personne bute par accident sur un obstacle, les ajustements posturaux qui lui permettent de récupérer son équi-

libre sont rétroactifs. Ils interviennent immédiatement après la perturbation de la posture et reposent sur des mécanismes réflexes (Nashner, Shumway-Cook et Marin, 1983 ; Horak et Nashner, 1986 ; Forssberg et Hirschfeld, 1994). Au contraire, dans les conditions optimales d'exécution d'un geste, la posture est contrôlée par anticipation. L'APA permet de soutenir l'initiation du mouvement et de maintenir la position malgré un changement de la répartition des forces dans le corps. Cette préparation posturale consiste en l'activation ou l'inhibition de groupes musculaires avant qu'une perturbation de la position ait lieu. L'APA crée dans le corps une force dont la direction est strictement opposée à celle de la déstabilisation prévue, et qui vient s'y opposer le moment venu (Bouisset et Zattara, 1987 ; Massion, 1992).

LES REPRÉSENTATIONS INTERNES DANS L'ANTICIPATION POSTURALE

Dans la perspective prescriptive de l'action, ici envisagée, le geste est représenté avant son exécution à partir non seulement des représentations internes du corps avec ses propriétés biomécaniques, mais aussi des intentions, des connaissances et des croyances de l'individu (Keele, 1968 ; Schmidt, 1975 ; Paillard, 1985 ; Jeannerod, 2003). De la même façon, une évaluation *préalable* des effets d'un événement sur la posture est nécessaire pour limiter les perturbations posturales par un APA. Les représentations internes dont dispose le sujet sur lui-même, son environnement et sur leurs interactions lui permettent de calibrer par avance la compensation nécessaire au maintien de la stabilité et de l'orientation du corps.

Les événements déstabilisants sont extrêmement divers et variables et impliquent des représentations différentes. Konzag et Konzag (1980, cités par Buekers, Pauwels et Meugens, 1988) opposent l'anticipation interne, prédiction qui concerne les actions propres d'un sujet et l'anticipation externe, dans laquelle entrent en compte des événements ou des éléments qui lui sont extérieurs. Cette distinction appliquée à l'anticipation posturale suggère que l'APA doit reposer, dans chaque cas, sur des représentations dont le contenu diffère.

L'anticipation est interne lorsque le sujet exécute un mouvement risquant de le déstabiliser par la modification de la posi-

tion des segments corporels entre eux ou par les forces d'inertie en jeu. Par exemple, l'inclinaison du haut du corps vers l'avant pourrait induire une perte d'équilibre si elle n'était pas précédée d'un APA qui permet, via une flexion des genoux, de transférer le centre de gravité vers l'arrière, c'est-à-dire en sens inverse de la perturbation théorique (Oddsson, 1990). L'APA repose dans ce cas sur une connexion spécifique qui le relie au mouvement et qui est activée automatiquement lors de son exécution. Le calibrage de l'APA dépend de la représentation interne du corps incluant sa géométrie et sa cinétique, en relation avec les valeurs de référence à stabiliser (orientation, verticale corporelle... ; Massion, 1992).

La perturbation posturale provoquée sur elle-même, par une personne qui lâche un objet ou bien le fait passer d'une main dans l'autre, peut également être considérée comme interne. Ainsi, le lâcher d'un ballon lesté ou d'une boîte maintenue à bout de bras est précédé d'un APA dont la principale fonction est d'empêcher une bascule du corps vers l'arrière consécutive au délestage (Aruin et Latash, 1995, 1996 ; Aruin, Ota et Latash, 2001 a). Le paradigme du *garçon de café* constitue une autre situation d'analyse de l'APA dont l'intérêt est d'être restreinte aux membres supérieurs et de permettre de distinguer un bras postural et un bras moteur. Il consiste à proposer au sujet de délester ou lester d'une main (bras moteur), un plateau ou un dispositif soutenu par l'autre main (bras postural). Il s'agit alors, à la manière du garçon de café, de maintenir stable le bras postural qui tient le plateau (Hugon, Massion et Wiesendanger, 1982 ; Johansson et Westling, 1988 ; Bennis, Roby-Brami, Dufossé et Bussel, 1996). Avant le délestage, une désactivation du biceps du bras postural compense par anticipation l'effet mécanique du retrait du poids. Dans le cas du lestage, c'est au contraire une activation anticipée du biceps postural qui précède la surcharge. Dans ces cas, où le sujet est à l'initiative de la perturbation posturale, l'organisation de l'APA intègre une représentation interne des propriétés biomécaniques du corps, mais cette fois-ci en interaction avec une représentation des propriétés inertielles de l'objet. Cette représentation s'ancre dans les réafférences sensorielles tactiles et proprioceptives disponibles par des boucles sensori-motrices *en temps réel* durant la tenue de l'objet (Johansson, 1996). La préparation posturale intègre ainsi le poids de l'objet impliqué dans la déstabilisation.

Lorsqu'une perturbation posturale implique des éléments extérieurs au sujet – le sujet n'en a pas l'initiative, ou bien ne dispose pas directement de toutes les informations sensorielles lui permettant d'en évaluer l'occurrence ou la puissance –, l'anticipation peut être décrite comme externe. C'est le cas quand un sujet reçoit sur sa main, ou dans un réceptacle, un objet en chute libre (Latash, Aruin, Neyman et Nicholas, 1995 ; Aruin *et al.*, 2001 *a* ; Aruin, Shiratori et Latash, 2001 *b*). Dans ce paradigme, un APA apparaît dans des circonstances particulières. Tout d'abord, la vision de l'objet qui choit favorise l'anticipation posturale, en permettant notamment au sujet de déterminer précisément la chronométrie du lestage. Ainsi, la substitution du contrôle visuel par un signal sonore diminue la qualité de l'anticipation posturale (Lacquaniti et Maioli, 1987, 1989 *b*). Enfin, la connaissance du poids de l'objet lesté est nécessaire pour évaluer la puissance de la perturbation posturale : l'APA dépend de l'énergie cinétique ou du moment de force de l'objet à la réception (Lacquaniti et Maioli, 1989 *a* ; Shiratori et Latash, 2001). Le même phénomène d'anticipation externe peut être invoqué lors de la préparation posturale au soulèvement d'un objet (Commissaris et Toussaint, 1997 ; Toussaint, Michies, Faber, Commissaris et van Dieen, 1998 ; Forssberg, Jucaite et Hadders-Algra, 1999).

L'organisation de l'APA doit donc coordonner de façon précise la représentation interne des propriétés géométriques et cinétiques du corps avec le poids de l'objet impliqué dans la perturbation posturale, qui, cette fois-ci n'est pas accessible via les réafférences sensorielles. La représentation du poids est construite et mémorisée au cours de manipulations antérieures d'un objet (Jeannerod, 1994) et est contenue dans une mémoire commune au contrôle de l'anticipation posturale et du mouvement volontaire (Forssberg *et al.*, 1999). Cette question du recours à une information mémorisée est fondamentale dans la distinction entre l'organisation de l'APA dans le cas du soulèvement/réception (anticipation externe) et celui du lestage / délestage bimanuel (anticipation interne).

En résumé, l'organisation de l'APA requiert des représentations dont le contenu diffère selon que la perturbation posturale résulte d'une action propre du sujet, ou qu'elle implique des éléments qui lui sont extérieurs. Les études de Shiratori et Latash (2001) et de Nowak et Hermsdorfer (2004) confortent cette dis-

inction en comparant les APA associés à la réception d'objet où le sujet voit la chute et connaît le poids de l'objet mais où le lestage est initié soit par le sujet lui-même, soit par l'expérimentateur. Les résultats montrent clairement la présence d'APA dans les deux conditions de lestage, mais l'APA débute plus tardivement et est moins reproductible lors de l'anticipation externe, autrement dit lorsque le sujet a recours à la trace mnésique du poids de l'objet.

2. DÉVELOPPEMENT DU CONTRÔLE POSTURAL : DE LA RÉTROACTION À LA PROACTION

PRINCIPE DE CONSTRUCTION ET DÉVELOPPEMENT DES APA

La construction des APA reposerait, selon un large consensus, sur la transformation des corrections posturales consécutives à l'exécution d'un mouvement en un ajustement associé de façon anticipée aux prochaines exécutions de ce mouvement (cf. Massion, 1992). Selon la théorie sélectionniste, l'enfant disposerait à la naissance d'un répertoire inné de synergies posturales au sein duquel s'opère une sélection progressive (Sporn et Edelman, 1993 ; Hadders-Algra, Brogren, Forssberg, 1996). Les réactions posturales reposeraient ainsi sur un réseau préformé, stabilisé au cours du développement. Ce réseau pourrait être aussi mobilisé pour les premières anticipations posturales (Hirschfeld et Forssberg, 1994 ; Massion, 1998).

Le fait que les rétroactions soient essentielles à la construction de l'anticipation posturale implique que le contrôle rétroactif de la posture précède le contrôle proactif (Haas, Diener, Rapp et Dichgans, 1989 ; Massion, 1992 ; Hay et Redon, 1999). Du point de vue du développement, le contrôle rétroactif n'a, toutefois, pas besoin d'être maîtrisé pour que débute le contrôle anticipé de la posture. Ainsi, pour Shumway-Cook et Woollacott (1995), les modes de contrôle proactif et rétroactif se développent parallèlement et s'alimentent mutuellement. Par exemple, dans une tâche de délestage volontaire, les enfants de 6 à 8 ans contrôlent principalement leur stabilité de façon proactive, alors que les adultes s'appuient parfois sur un contrôle rétroactif, cer-

tainement du fait d'une tolérance plus importante au déséquilibre (Hay et Redon, 1999, 2001).

Les mécanismes présidant au développement de l'anticipation posturale intègrent à la fois des facteurs maturationnels et épigénétiques. Selon Ledebt, Bril et Brenière (1998), l'anticipation posturale dans la marche ou d'autres habiletés motrices dépend plus de l'exercice que de la maturation neuronale, bien que celle-ci soit une part importante du développement moteur précoce. D'une façon plus formelle, Shumway-Cook et Woollacott (1995) expliquent que le développement du contrôle postural repose sur celui d'au moins sept systèmes qui sont soumis de façon différentielle aux interactions avec l'environnement et à la maturation : les composantes musculo-squelettiques, les synergies neuromusculaires, les systèmes sensoriels, les stratégies sensoriellles, les représentations internes et, enfin, les mécanismes d'anticipation et d'adaptation. Ainsi, par exemple, le nombre d'essais nécessaire à l'apprentissage de PAPA associé à une nouvelle coordination bimanuelle diminue avec l'âge, ce qui exclut l'expérience comme seul facteur de développement (Schmitz et Assaiante, 2002).

DU CONTRÔLE RÉTROACTIF AU CONTRÔLE PROACTIF DE LA POSTURE : DONNÉES EXPÉRIMENTALES

L'acquisition du contrôle proactif à partir du contrôle rétroactif constitue un changement qualitatif du contrôle de la posture qui trouve des échos dans les résultats des recherches portant sur le développement des APA dans des conditions d'anticipation interne. Par exemple, c'est entre 9 et 15 mois que l'atteinte manuelle est précédée par un APA systématique du tronc coordonné à l'avancée du bras (von Hofsten et Woollacott, 1989 ; von Hofsten et Ronnqvist, 1993 ; van der Fits, Otten, Klip, Van Eykern et Hadders-Algra, 1999). Malgré leur divergence, les études montrent que l'APA suit de plusieurs mois les premières atteintes volontaires. Une période d'exercice de plusieurs mois est donc nécessaire à l'établissement des premiers APA. De la même façon, Barela, Jeka et Clark (1999) rapportent que le contrôle postural de la station debout devient proactif à partir du moment où l'enfant fait l'expérience de la marche (13,5 mois dans leur étude).

Lors de l'initiation d'un pas, le contrôle anticipé de la posture consiste en un déplacement latéral du poids du corps vers la jambe pivot et en une inclinaison latérale du pelvis, ce qui permet de décharger la jambe mobile. Comme pour la station érigée prélocomotrice, cet ajustement apparaît après les premiers pas, entre 18 et 30 mois mais sous une forme incomplète. Il s'affine et s'élabore encore à 4 ans (Brenière, Bril et Fontaine, 1989 ; Assaiante, Woollacott et Amblard, 2000). C'est seulement autour de 6-8 ans que les APA associés à l'initiation de la marche sont comparables à ceux de l'adulte (Ledebt *et al.*, 1998).

L'émergence des APA associés à un mouvement volontaire a aussi été analysée dans des tâches plus éloignées du répertoire habituel de l'enfant. L'importance de la pratique se traduit alors par une acquisition plus tardive. Ainsi, le transfert anticipé du centre de pression vers l'avant, nécessaire au passage sur la pointe des pieds, semble impossible avant 4 ans (Haas *et al.*, 1989) et l'ajustement anticipé associé à l'élévation rapide des bras apparaît entre 3,6 mois et 4 ans (Riach et Hayes, 1990 ; Hay et Redon, 2001).

Lors de la manipulation d'objet, la calibration de la préparation posturale au lestage et au délestage implique le recours à une représentation interne des propriétés inertielles de l'objet, coordonnée à celle portant sur les propriétés biomécaniques du corps. En demandant à des enfants debout de laisser tomber une boîte qu'ils maintiennent entre leurs avant-bras horizontaux, Hay et Redon (1999) montrent qu'une préparation posturale permettant de compenser la modification de répartition du poids dans le corps est visible dès 3 ans. De la même façon, lorsqu'ils transfèrent un objet d'une main vers une nacelle maintenue par l'autre, les enfants augmentent de façon anticipée la force de saisie de la nacelle à partir de 2 ans ; préparation qui, en outre, dépend du poids de l'objet que l'enfant s'apprête à déposer (75 g ou 150 g) (Eliasson, Forssberg, Ikuta, Apel, Westling et Johansson, 1995). Dans une situation inspirée du *paradigme du garçon de café* où les enfants déposent un objet tenu dans la main droite, sur un plateau posé sur leur main gauche, nous avons également observé que le lestage est précédé d'une flexion du coude gauche dès 20 mois (Jover, 2002). Nous avons interprété cette flexion comme un APA, autrement dit comme le déploiement d'une force de direction inverse à celle résultant du lestage et permettant d'en limiter les répercussions. Ce résultat peut être rapproché de

celui de Schmitz, Martin et Assaiante (1999, 2002) dans une situation de délestage bimanuel. Dans leur étude développementale, le groupe d'enfants les plus jeunes (4 ans) montre une préparation anticipée du coude au délestage. Cet APA consiste majoritairement, à cet âge, en des co-contractions des extenseurs et des fléchisseurs du coude. Enfin, en testant l'effet du poids de l'objet délesté chez des enfants de 5 à 12 ans, ces auteurs montrent que tous les enfants s'ajustent au poids de l'objet en limitant l'utilisation de patrons de co-contraction lorsque l'objet est lourd (Schmitz, Assaiante et Gepner, 2003).

L'intégralité de ces études note que la principale caractéristique des APA, à leur émergence, est leur forme immature. Celle-ci se traduit notamment par une variabilité intra-individuelle très importante où les activations musculaires ne sont pas systématiques et peu reproductibles. En outre, les synergies musculaires impliquées sont peu différenciées : les patterns d'activation consistent majoritairement en des co-contractions d'amplitude parfois très importante. Enfin, de façon typique, les APA sont, à leur apparition, mal synchronisés avec le mouvement volontaire : la concordance temporelle avec le début de la perturbation est approximative et variable.

La lenteur du développement de la préparation posturale rend compte de la complexité des mécanismes impliqués. En effet, la croissance des muscles, du squelette et la maturation du système nerveux induisent des modifications qui influencent la représentation interne du corps, à la fois dans ses propriétés géométriques et cinétiques, mais aussi lors des interactions avec l'environnement et les objets.

3. DÉVELOPPEMENT DE L'INTÉGRATION DE LA CONNAISSANCE DU CONTEXTE À L'ANTICIPATION POSTURALE

L'organisation de l'APA dans les cas d'anticipation interne est largement étudiée et son développement est de mieux en mieux compris. Tel n'est pas le cas pour l'anticipation externe, autrement dit l'anticipation posturale d'événements impliquant des éléments extérieurs à l'enfant. Le calibrage de cet APA est spécifique car il implique les représentations de l'environnement

contenues en mémoire. Le développement de l'utilisation de ces représentations dans le contrôle proactif de la posture est peu exploré, mais les recherches portant sur le développement du contrôle du mouvement permettent de construire des hypothèses de travail.

REPRÉSENTATION DES PROPRIÉTÉS DES OBJETS
ET ORGANISATION DU MOUVEMENT :
DONNÉES EXPÉRIMENTALES

Les études sur l'organisation anticipée du mouvement volontaire sont nombreuses et permettent d'aborder la question de l'utilisation des représentations des objets. Chez l'adulte, de nombreuses recherches s'accordent pour montrer que l'ouverture de la main et la force développée dans la saisie d'un objet dépendent de la représentation de ses propriétés et de l'action à effectuer (Arbib, 1990 ; Jeannerod, 1994 ; Johansson, 1996).

Du point de vue du développement, les progrès du contrôle moteur reposent sur l'émergence progressive du contrôle proactif (von Hofsten, 1993). Lors du paramétrage du mouvement, l'enfant intègre et coordonne un nombre croissant de séquences motrices (Forssberg, Eliasson, Kinoshita, Johansson et Westling, 1991 ; Konczak et Dichgans, 1997). Les contraintes environnementales et les propriétés des objets sont progressivement prises en compte de façon anticipée, qu'elle soient accessibles visuellement ou non : orientation (Lockman, Ashmead et Bushnell, 1984 ; Rochat, 1992), taille (von Hofsten et Rönnqvist, 1988 ; Siddiqui, 1995 ; Fagard et Jacquet, 1996 ; Butterworth, Verweij et Hopkiins, 1997), texture (Forssberg, Eliasson, Kinoshita, Westling et Johansson, 1995) et poids (Mounoud, 1973 ; Mounoud et Bower, 1974 ; Hauert, 1980 ; Hauert, Mounoud et Mayer, 1981 ; Forssberg, Kinoshita, Eliasson, Johansson, Westling et Gordon, 1992). Bushnell et Boudreau ont proposé, en 1998, une synthèse éclairée de ces recherches.

La prise en compte anticipée du poids d'un objet lors de sa saisie est particulièrement intéressante pour explorer l'intégration des représentations des propriétés de l'environnement dans l'organisation du mouvement. En effet, celui-ci n'est pas directement accessible visuellement mais est contenu dans une

représentation pragmatique, activée au moment de la préparation motrice (Jeannerod, 1981, 1994). Chez l'adulte, l'identification visuelle d'un objet familier active une représentation mnésique précise concernant son poids, et la saisie est alors adéquatement programmée dès le 1^{er} essai (Gordon, Westling, Cole et Johansson, 1993).

Chez l'enfant, la prise en compte du poids dans la saisie est, tout d'abord, concomitante au soulèvement, c'est-à-dire qu'elle dépend des réafférences sensorielles. Ce mode d'ajustement est prépondérant entre 6 et 7 mois lorsque les mesures portent sur l'élévation du bras (Mounoud et Bower, 1974) et jusqu'à 24 mois pour la régulation de la force de saisie pouce/index (Forssberg, Kinoshita *et al.*, 1992). La divergence entre ces âges peut être imputée au caractère proximal (bras) ou distal (doigts) des mesures opérées. En effet, dans le premier cas, la prise en compte du poids est plus précoce que dans le second, ce qui est concordant avec le développement proximo-distal du contrôle du geste (von Hofsten, 1984). Le poids des objets est ensuite intégré au contrôle anticipé du geste, à partir des informations sensorielles acquises lors du soulèvement précédent. L'anticipation est mise en évidence par une perturbation de la fluidité du geste lors de la substitution d'un objet par un leurre apparemment identique mais de poids différent ; autour de 9-10 mois au niveau proximal (Mounoud, 1973 ; Mounoud et Bower, 1974) et entre 12 et 24 mois au niveau distal (Forssberg *et al.*, 1992). Enfin, l'ajustement anticipé du mouvement au poids dépend progressivement de la taille et de la familiarité des objets. L'enfant parvient à prévoir le poids d'un objet jamais soulevé en opérant une prédiction sur la relation entre la taille et le poids. Ainsi, l'ajustement anticipé au poids dans une tâche de sériation apparaît nettement autour de 3,6 ans (Hauert, 1980 ; Hauert *et al.*, 1981 ; Gordon, Forssberg, Johansson, Eliasson et Westling, 1992) et s'affine encore jusqu'à 9 ans (Gachoud, Mounoud et Hauert, 1983). En résumé, la capacité à extraire, stocker et utiliser par anticipation des propriétés des objets qui ne sont pas accessibles par la vision résulte d'un processus complexe dont le développement nécessite une dizaine d'années (Forssberg, 1999).

RECHERCHES ET HYPOTHÈSES SUR L'INTÉGRATION
DES CONNAISSANCES
À L'ANTICIPATION POSTURALE CHEZ L'ENFANT SAIN

Dans le cas de l'anticipation externe, la préparation posturale nécessite, de la même façon que pour l'anticipation interne, une coordination entre les représentations internes du corps et celles dont le sujet dispose sur le contexte et les objets qui l'entourent et avec lesquels il interagit. Les propriétés de l'environnement pertinentes pour ajuster la préparation de la posture ne sont pas toutes accessibles par la vision. Le cas du poids des objets a retenu notre attention car cette propriété est déterminante dans le paramétrage de l'APA et sa prise en compte anticipée requiert l'activation d'une représentation mnésique (cf. Lacquaniti et Maioli, 1989 *a* ; Shiratori et Latash, 2001).

Les études développementales qui examinent l'intégration de la représentation des propriétés des objets dans l'anticipation posturale d'événements externes sont rares. Plusieurs champs de recherche nourrissent cependant cette problématique. Tout d'abord, APA et mouvement volontaire pourraient être organisés au sein d'un même programme moteur (Latash, 1995 ; Aruin et Latash, 1995 ; Toussaint *et al.*, 1997). En second lieu, ils pourraient recourir à des représentations communes des propriétés des objets (Forssberg *et al.*, 1999). Enfin, le développement du contrôle du mouvement volontaire est intimement lié à celui de la posture (Thelen et Smith, 1994 ; Bertenthal et von Hofsten, 1998). Ainsi, nous nous attendons à ce que le contrôle de l'APA, au même titre que celui du mouvement volontaire, intègre progressivement de façon proactive les connaissances de l'enfant sur l'environnement et le contexte.

Dans un paradigme expérimental dans lequel des enfants debout, âgés de 10 à 17 mois, ouvrent un tiroir, Witherington, von Hofsten, Rosander, Robinette, Woollacott et Bertenthal (2002) montrent que des APA coordonnés à la traction apparaissent à partir de 13 mois. Après quatre essais, la force de résistance du tiroir est doublée et les résultats révèlent que les enfants répondent en ajustant la préparation posturale à cette propriété (lourd/léger) aux essais suivants lorsqu'ils savent ouvrir les tiroirs depuis au moins trois mois. L'APA dépend donc, chez les enfants

qui en ont l'expérience, d'une représentation mémorisée des propriétés de l'environnement dans lequel se déroule l'action.

Nous avons exploré cette question en analysant les ajustements posturaux dans une situation de lestage de plateau (fig. 1) inspirée de celle du garçon de café décrite ci-dessus (Jover, 2000, 2002 ; Jover et Mellier, 2005).

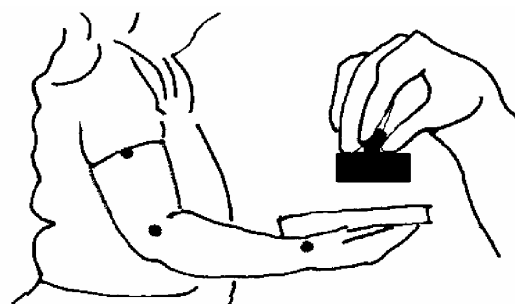


Figure 1 : Représentation schématique de la situation de lestage

Schematic representation of the loading task

Dans ce paradigme, l'enfant a le bras droit fléchi, de telle sorte que l'avant-bras soit à l'horizontale. Un petit plateau est posé sur sa main en pronation, et l'expérimentateur y dépose un objet en invitant l'enfant à maintenir son bras immobile. Cette situation permet de contrôler la connaissance qu'a l'enfant du poids que l'expérimentateur dépose sur son plateau (objet connu, inconnu, leurre...). Les enfants, âgés de 21 à 40 mois, sont debout sur une plate-forme de force et filmés de profil. En analysant les déviations angulaires du coude et les déplacements du centre de pression avant, pendant et après le lestage, nous avons vérifié que le contrôle de la position du coude tient progressivement compte du poids de l'objet préalablement manipulé. Les résultats montrent que les enfants de plus de 26 mois stabilisent mieux leur coude lorsqu'ils ont auparavant manipulé l'objet lesté (Jover et Mellier, 2005). C'est également durant la troisième année (30 mois) que la stabilité de la posture est perturbée par le lestage d'un leurre : objet visuellement identique à celui utilisé auparavant mais plus léger (Jover, 2002).

Ces résultats suggèrent que l'émergence de l'utilisation des représentations des objets dans l'organisation proactive de la

posture est contemporaine de leur actualisation dans l'organisation proactive du mouvement. En effet, les âges auxquels nous observons une amélioration de l'APA liée à la manipulation préalable des objets sont concordants avec ceux de Forssberg et collaborateurs (1992) qui concluent que les enfants intègrent la représentation du poids de l'objet à l'organisation anticipée de la saisie à partir de 24 mois.

Ces recherches ouvrent une voie d'étude sur le développement de l'intégration des connaissances à l'organisation anticipée de la posture. Les représentations portant sur l'environnement et le contexte qui sont stockées en mémoire sont peu à peu incorporées au contrôle proactif de la posture de la même façon qu'elles le sont au contrôle proactif du mouvement. Nous pensons que ces recherches doivent être complétées afin d'analyser les étapes de ce processus au cours du développement. Schmitz et collaborateurs (2002) ont ainsi pu montrer dans leur tâche de coordination bimanuelle que l'anticipation posturale débutait par une forte prédominance de co-contraction musculaire avant qu'une anticipation coordonnée et constituée de patrons d'inhibition réciproque ne se mette en place et devienne majoritaire. Nous ignorons si de telles stratégies existent dans le cas d'anticipation externe et si elles se développent de la même façon.

D'autre part, la comparaison du développement de l'intégration des connaissances sur le contexte dans l'anticipation appliquée à la fois au mouvement volontaire et à la posture n'a, à notre connaissance, jamais été conduite. Nous pensons ainsi qu'il doit être possible de faire un lien entre la prise en compte du poids des objets dans la saisie et dans l'anticipation posturale lors du lestage du bras/plateau par une tierce personne. La mise en évidence d'un lien développemental de ces deux compétences apporterait des arguments décisifs à l'organisation coordonnée des versants moteurs et posturaux de l'action. Cette problématique de l'influence des connaissances dans l'anticipation posturale chez l'enfant a donc l'avantage de nourrir à la fois les modèles sur la coordination entre mouvement et posture, mais aussi la question clé des déterminants cognitifs de l'action au cours du développement.

RÉSUMÉ

L'article expose une revue de travaux sur le développement de l'ajustement postural anticipé (APA). Il définit la notion d'APA en distinguant l'anticipation interne et l'anticipation externe. Les études sur le développement de l'APA dans des situations d'anticipation interne montrent que la posture intègre progressivement les perturbations posturales associées à un mouvement volontaire de façon anticipée. L'anticipation posturale d'un événement externe nécessite, pour être calibrée, que le sujet connaisse les propriétés de l'événement déstabilisant (par exemple, le poids d'un objet à réceptionner). Le développement de cette anticipation durant l'enfance permet d'envisager plusieurs hypothèses sur les liens entre connaissance du contexte et anticipation posturale.

Mots clés : anticipation posturale, développement, contrôle proactif, représentation des objets.

BIBLIOGRAPHIE

- Arbib M. A. — (1990). Programs, schemas, and neural networks for control of hand movements : Beyond the RS framework, *in* M. Jeannerod (Edit.), *Attention and Performance XIII : Motor Programs : Concepts and Issues*, Hillsdale (NJ), Lawrence Erlbaum Associates, 111-138.
- Aruin A. S., Latash M. L. — (1995) The role of motor action in anticipatory postural adjustments studied with self-induced and externally triggered perturbations, *Experimental Brain Research*, 106 (2), 291-300.
- Aruin A. S., Latash M. L. — (1996) Anticipatory postural adjustments during self-initiated perturbations of different magnitude triggered by a standard motor action, *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 101 (6), 497-503.
- Aruin A. S., Ota T., Latash M. L. — (2001 a) Anticipatory postural adjustments associated with lateral and rotational perturbations during standing, *Journal of Electroencephalography and Kinesiology*, 11, 39-51.
- Aruin A. S., Shiratori T., Latash M. L. — (2001 b) The role of action in postural preparation for loading and unloading in standing subjects, *Experimental Brain Research*, 138, 458-466.
- Assaiante C., Woollacott M. H., Amblard B. — (2000) Development of postural adjustment during gait initiation : Kinematic and EMG analysis, *Journal of Motor Behavior*, 32 (3), 211-226.
- Barela J. A., Jeka J. J., Clark J. E. — (1999) The use of somatosensory information during the acquisition of independent upright stance, *Infant Behavior and Development*, 22 (1), 87-102.
- Bennis N., Roby-Brami A., Dufossé M., Bussel B. — (1996) Anticipatory responses to a self-applied load in normal subjects and hemiparetic patients, *Journal of Physiology (Paris)*, 90 (1), 27-42.

- Bertenthal B. I., Von Hofsten C. — (1998) Eye, head and trunk control : The foundation for manual development, *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 22 (4), 515-520.
- Bouisset S., Zattara M. — (1987) Biomechanical study of the programming of anticipatory postural adjustments associated with voluntary movement, *Journal of Biomechanic*, 20 (8), 735-742.
- Bower T. G. — (1978) La notion d'objet : les yeux, les mains et la parole, in H. Hécaen et M. Jeannerod (Édit.), *Du contrôle moteur à l'organisation du geste*, Paris, Masson, 158-167.
- Brenière Y., Bril B., Fontaine R. — (1989) Analysis of the transition from upright stance to steady state locomotion in children with under 200 days of autonomous walking, *Journal of Motor Behavior*, 21 (1), 20-37.
- Buekers M., Pauwels J., Meugens P. — (1988). Temporal and spatial anticipation in twelve-years-old boys and girls, in A. Colley et J. Beech (Edit.), *Cognition and Action in Skilled Behaviour*, Amsterdam, Elsevier Science Publishers B.V., 283-292.
- Bushnell E. W., Boudreau J.-P. — (1998) Exploring and exploiting objects with the hands during infancy, in K. Connolly (Edit.), *The Psychobiology of the Hand*, London, Mac Keith Press, 144-161.
- Butterworth G. E., Verweij E., Hopkins B. — (1997) The development of prehension in infants : Halverson revisited, *British Journal of Developmental Psychology*, 5, 223-236.
- Commissaris D. A. C., Toussaint H. M. — (1997) Load knowledge affects low-back loading and control of balance in lifting tasks, *Ergonomics*, 40 (5), 559-575.
- Eliasson A.-C., Forssberg H., Ikuta K., Apel I., Westling G., Johansson R. S. — (1995) Development of human precision grip. V. Anticipatory and triggered grip actions during sudden loading, *Experimental Brain Research*, 106 (3), 425-433.
- Fagard J., Jacquet A. Y. — (1996) Changes in reaching and grasping objects of different sizes between 7 and 13 months of age, *British Journal of Developmental Psychology*, 14, 65-78.
- Forssberg H. — (1999) Developmental aspects on use of internal models in the control of dexterous manipulation, *Acta Physiologica Scandinavica*, 167, A3-A28.
- Forssberg H., Eliasson A.-C., Kinoshita H., Johansson R. S., Westling G. — (1991) Development of human precision grip. I : Basic coordination of force, *Experimental Brain Research*, 85 (2), 451-457.
- Forssberg H., Eliasson A. C., Kinoshita H., Westling G., Johansson R. S. — (1995) Development of human precision grip. IV. Tactile adaptation of isometric finger forces to the frictional condition, *Experimental Brain Research*, 104 (2), 323-330.
- Forssberg H., Hirschfeld H. — (1994) Postural adjustments in sitting humans following external perturbation : Muscle activity and kinematics, *Experimental Brain Research*, 97, 515-527.
- Forssberg H., Kinoshita H., Eliasson A. C., Johansson R. S., Westling G., Gordon A. M. — (1992) Development of human precision grip. II. Anticipatory control of isometric forces targeted for object's weight, *Experimental Brain Research*, 90 (2), 393-398.
- Forssberg H., Jucaite A., Hadders-Algra M. — (1999) Shared memory representations for programming of lifting movements and associated whole body postural adjustments in humans, *Neuroscience Letters*, 273, 9-12.

- Gachoud J. P., Mounoud P., Hauert C.-A. — (1983) Motor strategies in lifting movements : A comparison of adult and child performance, *Journal of Motor Behavior*, 15 (3), 202-216.
- Gahery Y. — (1987) Associates movements, postural adjustments and synergies : Some comments about the history and significance of three motor concepts, *Archives italiennes de biologie*, 125, 345-360.
- Gordon A. M., Westling G., Cole K. J., Johansson R. S. — (1993) Memory representations underlying motor commands used during manipulation of common and novel objects, *Journal of Neurophysiology*, 69 (6), 1789-1796.
- Gordon A. M., Forssberg H., Johansson R. S., Eliasson A. C., Westling G. — (1992) Development of human precision grip. III : Integration of visual size cues during the programming of isometric forces, *Experimental Brain Research*, 90 (2), 399-403.
- Haas G., Diener H. C., Rapp H., Dichgans J. — (1989) Development of feedback and feedforward control of upright stance, *Developmental Medicine and Child Neurology*, 31 (4), 481-488.
- Hadders-Algra M., Brogren E., Forssberg H. — (1996) Ontogeny of postural adjustments during sitting in infancy : Variation, selection and modulation, *Journal of Physiology (London)*, 493, 273-88.
- Hauert C.-A. — (1980) Propriétés des objets et propriétés des actions chez l'enfant de 2 à 5 ans, *Archives de psychologie*, 48 (monographie 7), 95-168.
- Hauert C.-A., Mounoud P., Mayer E. — (1981) Approche du développement cognitif des enfants de 2 à 5 ans à travers l'étude des caractéristiques physiques de leurs actions, *Cahiers de psychologie cognitive*, 1, 33-54.
- Hay L., Redon C. — (1999) Feedforward versus feedback control in children and adults subjected to a postural disturbance, *Experimental Brain Research*, 125 (2), 153-162.
- Hay L., Redon C. — (2001) Development of postural adaptation to arm raising, *Experimental Brain Research*, 139 (2), 224-232.
- Hess W. R. 0151 (1943) Teleokinetisches und ereismatisches Kräftesystem in der Biomotorik, *Helvetica Physiology and Pharmacology (acta 1)*, C62-C63.
- Hirschfeld H., Forssberg H. — (1994) Epigenetic development of postural responses for sitting during infancy, *Experimental Brain Research*, 97 (3), 528-540.
- Horak F. B., Nashner L. M. — (1986) Central programming of postural movements : Adaptation to altered support-surface configurations, *Journal of Neurophysiology*, 55 (6), 1369-1381.
- Hugon M., Massion J., Wiesendanger M. — (1982) Anticipatory postural changes induced by active unloading and comparison with passive unloading in man, *Pflugers Archiv*, 393 (4), 292-296.
- Jeannerod M. — (1981). Intersegmental coordination during reaching at natural visual objects, in J. T. Long et A. Baddeley (Edit.), *Attention and Performance IX*, Hillsdale (NJ), Lawrence Erlbaum, 153-168.
- Jeannerod M. — (1994). Object oriented action, in K. Bennett et U. Castiello (Edit.), *Insights into the Reach to Grasp Movement*, Amsterdam, Elsevier Sciences Publishers B.V., 3-15.
- Jeannerod M. — (2003) *La nature de l'esprit*, Paris, Odile Jacob.
- Johansson R. S. — (1996). Sensory control of dexterous manipulation in humans, in A. M. Wing, P. Haggard et J. R. Flanagan (Edit.), *Hand and Brain : The Neurophysiology and Psychology of Hand Movements*, San Diego, Academic Press, 381-414.

- Johansson R. S., Westling G. — (1988) Programmed and triggered actions to rapid load changes during precision grip, *Experimental Brain Research*, 71 (1), 72-86.
- Jover M. — (2000). Perspectives actuelles sur le développement du tonus et de la posture, in J. Rivière (Édit.), *Le développement psychomoteur du jeune enfant. Idées neuves et approches actuelles*, Marseille, Solal, 13-52.
- Jover M. — (2002) *L'ajustement postural anticipé entre 2 et 4 ans : développement et anticipation du poids des objets*, Doctorat en psychologie, Université de Rouen.
- Jover M., Mellier D. — (2005) Effet de la connaissance du poids des objets sur l'ajustement postural anticipé chez le jeune enfant, *Arob@se*.
- Keele S. W. — (1968) Movement control in skilled motor performance, *Psychological Bulletin*, 70, 387-403.
- Konczak J., Dichgans J. — (1997) The development toward stereotypic arm kinematics during reaching in the first 3 years of life, *Experimental Brain Research*, 117, 346-354.
- Konzag I., Konzag G. — (1980) Anforderungen an die kognitiven Funktionen in der psychischen Regulation sportlicher Spielhandlungen, *Theorie und Praxis der Körperkultur*, 29, 20-31.
- Lacquaniti F., Maioli C. — (1989 a) The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching, *Journal of Neuroscience*, 9 (1), 134-148.
- Lacquaniti F., Maioli C. — (1989 b) Adaptation to suppression of visual information during catching, *Journal of Neuroscience*, 9 (1), 149-159.
- Latash M. L. — (1995) The relation between posture and movement : A study of a simple synergy in a two-joint task, *Human Movement Science*, 14, 79-110.
- Ledeht A., Bril B., Brenière Y. — (1998) The build-up of anticipatory behaviour. An analysis of the development of gait initiation in children, *Experimental Brain Research*, 120 (1), 9-17.
- Lockman J. J., Ashmead D. H., Bushnell E. W. — (1984) The development of anticipatory hand orientation during infancy, *Journal of Experimental Child Psychology*, 37, 176-186.
- Massion J. — (1992) Movement, posture and equilibrium : Interaction and coordination, *Progress in Neurobiology*, 38 (1), 35-56.
- Massion J. — (1994) Postural control system, *Current Opinion in Neurobiology*, 4 (6), 877-887.
- Massion J. — (1998) Postural control systems in developmental perspective, *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 22 (4), 465-472.
- Mounoud P. — (1973) Les conservations physiques chez les bébés, *Bulletin de psychologie*, 312 (27, 13-14), 722-728.
- Mounoud P., Bower T. G. — (1974) Conservation of weight in infants, *Cognition*, 3 (1), 29-40.
- Nowak D. A., Hermsdorfer J. — (2004) Predictability influences finger force control when catching a free-falling object, *Experimental Brain Research*, 154 (4), 411-416.
- Oddsson L. I. — (1990). Control of voluntary trunk movements in man. Mechanisms for postural equilibrium during standing, *Acta Physiologica Scandinavica Supplementum*, 595, 1-60.
- Paillard J. — (1971) Les déterminants moteurs de l'organisation spatiale, *Cahiers de psychologie*, 14, 261-316.
- Paillard J. — (1976). Tonus, posture et mouvement, in C. Kayser (Edit.), *Traité de psychologie*, Paris, Flammarion, vol. 3, 521-728.

- Paillard J. — (1985). Les niveaux sensori-moteur et cognitif du contrôle de l'action, in M. Laurent et P. Therme (Édit.), *Recherches en APS*, Marseille, Publications du Centre de recherche de l'UEREPS, 147-163.
- Riach C. L., Hayes K. C. — (1990) Anticipatory postural control in children, *Journal of Motor Behavior*, 22 (2), 250-266.
- Rochat P. — (1992) Self sitting and reaching in 5 to 8 month-old infants : The impact of posture and its development on early eye-hand coordination, *Journal of Motor Behavior*, 24 (2) 210-220.
- Schmidt R. A. — (1975) A schema theory of discrete motor skill learning, *Psychological Review*, 82 (4), 225-260.
- Schmitz C., Martin N., Assaiante C. — (1999) Development of anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children, *Experimental Brain Research*, 126 (2), 200-204.
- Schmitz C., Martin N., Assaiante C. — (2002) Developmental sequence in the acquisition of anticipation during a new-coordination in a bimanual-load lifting task in children, *Neuroscience Letters*, 330, 215-218.
- Schmitz C., 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*, 142 (3), 354-364.
- Schmitz C., Assaiante C., Gepner B. — (2003) Modulation de la réponse anticipée en fonction du poids à déléster : étude chez l'enfant sain et l'enfant autiste, *Revue TIP A*, 21, 207-211.
- Shiratori T., Latash M. L. — (2001) Anticipatory postural adjustments during load catching by standing subjects, *Clinical Neurophysiology*, 112, 1250-1265.
- Shumway-Cook A., Woollacott M. H. — (1995) *Motor Control. Theory and Practical Applications*, Baltimore (Maryland), Williams & Wilkins.
- Siddiqui A. — (1995) Object size as a determinant of grasping in infancy, *The Journal of Genetic Psychology*, 156 (3), 345-358.
- Sporns O., Edelman G. M. — (1993) Solving Bernstein's problem : A proposal for the development of coordinated movement by selection, *Child Development*, 64, 960-981.
- Thelen E., Smith L. — (1994) *A Dynamic Systems Approach to the Development of Cognition and Action*, Bradford, MIT Press.
- Toussaint H. M., Commissaris D. A. C., Hoozemans M. J., Ober M. J., Beek P. J. — (1997) Anticipatory postural adjustments before load pick up in a bi-manual whole body lifting task, *Medicine Sciences and Sports Exercises*, 29 (9), 1208-1215.
- Toussaint H. M., Michies Y. M., Faber M. N., Commissaris D. A. C., Van Dieen J. H. — (1998) Scaling anticipatory postural adjustments dependent on confidence of load estimation in a bi-manual whole-body lifting task, *Experimental Brain Research*, 120 (1), 85-94.
- Van Der Fits I. B., Otten E., Klip A. W., Van Eykern L. A., Hadders-Algra M. — (1999) The development of postural adjustments during reaching in 6- to 18-month-old infants : Evidence for two transitions, *Experimental Brain Research*, 126 (4), 517-528.
- Von Hofsten C. — (1984) Developmental changes in the organization of pre-reaching movements, *Developmental Psychology*, 20 (3), 378-388.
- Von Hofsten C. — (1993) Prospective control : A basic aspect of action development, *Human Development*, 36, 253-270.
- Von Hofsten C., Woollacott M. H. — (1989) Anticipatory postural adjustments during infants reaching, *Neuroscience Abstracts*, 15, 1199.

- Von Hofsten C., Rönnqvist L. — (1988) Preparation for grasping an object : A developmental study, *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 14 (4), 610-621.
- Von Hofsten C., Rönnqvist L. — (1993) The structuring of neonatal arm movements, *Child Development*, 64 (4), 1046-1057.
- Witherington D. C., Von Hofsten C., Rosander K., Robinette A., Woollacott M. H., Bertenthal B. I. — (2002) The development of anticipatory postural adjustments in infancy, *Infancy*, 3 (4), 495-517.