

L'effet de la connaissance du poids de l'objet sur l'ajustement postural anticipé chez le jeune enfant

Marianne Jover et Daniel Mellier

Laboratoire de Psychologie et Neurosciences de la Cognition PSY-CO EA 1780, Université de Rouen, F-76821 Mont St Aignan Cedex, m.jover@free.com

Le contrôle de la posture est un élément fondamental du développement des actions motrices (Shumway-Cook et Woollacott, 1995 ; Bertenthal et von Hofsten, 1998). En effet, l'exécution d'un mouvement repose sur une organisation tonico-posturale qui permet de stabiliser la position dans l'espace alors que les membres ou des parties du corps sont mobilisés vers un but. L'anticipation des modifications de l'équilibre associées à la réalisation des mouvements compose « l'ajustement postural anticipé » (APA dans la suite du texte). Son développement, qui s'organise et se manifeste au fil de l'acquisition des praxies, est étudié comme composante de la formation des actions motrices (saisie manuelle, station debout, marche) et dans des variations de contexte de réalisation des actions (saisie d'objets de poids différents, transfert d'une main dans l'autre, saisie sans contrôle visuel, etc.). La présente étude examine dans quelle mesure la connaissance du poids de l'objet à prendre ou à recevoir manuellement facilite l'anticipation posturale ajustée d'enfants de 2 à 40 mois, c'est-à-dire si les forces déployées par le bras anticipent les effets du poids à maintenir.

La littérature apporte des données sur les formes précoces des APA. En ce qui concerne la saisie manuelle d'un objet, c'est autour de 9 mois que les premières activations musculaires anticipées ont été notées par von Hofsten et Woollacott (1989) chez des enfants assis maintenus par les hanches. En revanche, les anticipations au niveau du cou ne sont observées qu'entre 15 et 18 mois quand les enfants ne sont pas pareillement tenus. Avant cette tranche d'âge et pour la saisie manuelle, les anticipations posturales sont inconsistantes et sporadiques (Van der Fits et Hadders-Algra, 1998 ; Van der Fits, Otten, Klip, Van Eykern et Hadders-Algra, 1999).

Dans une procédure où l'enfant debout doit ouvrir un tiroir, Witherington et coll. (2002) enregistrent une préparation posturale régulière et cohérente de la traction du tiroir autour de 13 mois. L'ajustement postural dans les situations de maintien de la station debout est contemporain des premiers pas vers 13,5 mois (Barela, Jeka et Clark, 1999), alors que le contrôle anticipé de la posture nécessaire à l'initiation d'un pas apparaît après la première locomotion autonome entre 18 et 30 mois et sous une forme incomplète. Cet APA s'améliore jusqu'à 4 ans où le déséquilibre nécessaire à l'initiation de la marche est maîtrisé (Brenière, Bril et Fontaine, 1989) et où le contrôle postural anticipé est synchronisé à l'initiation du pas (Assaiante, Woollacott et Amblard, 2000). L'APA à l'initiation d'un pas continue à progresser jusqu'à 6 et 8 ans (Ledebt, Bril et Brenière, 1998), âge où la marche adopte des allures proches de celle de l'adulte.

L'effet de l'expérience s'exprime aussi par le fait que, dans des tâches plus éloignées du répertoire habituel de l'enfant, les premiers APA sont observés plus tardivement que dans le répertoire courant des actions. Par exemple, avant 4 ans, le passage des pieds au sol à la station sur la pointe des pieds ne s'accompagne pas du transfert anticipé du centre de pression vers l'avant. Jusqu'à cet âge, les enfants ne parviennent pas à exécuter la consigne (Haas, Diener, Rapp et Dichgans, 1989). De même, le contrôle anticipé de la posture lors de l'élévation rapide des deux bras apparaît à 3,5 - 4 ans (Riach et Hayes, 1990 ; Hay et Redon, 2001).

Il s'avère ainsi que, pour la saisie comme pour la locomotion, le contrôle proactif de la posture ne s'impose pas dès les premières étapes de la formation d'une action, qu'il nécessite une expérience des positions pour une situation donnée et qu'il est susceptible de développement au fur et à mesure que l'action évolue vers les formes adultes.

Le développement de l'anticipation posturale est encore étudié dans des tâches de transfert d'un objet d'une main dans l'autre ou de dépôt de l'objet dans un panier suspendu au bras controlatéral. Eliasson et collaborateurs (1995) montrent ainsi qu'une augmentation anticipée de la force de tenue du panier est présente à partir de 2 ans et que cet ajustement anticipé dépend du poids que l'enfant s'apprête à déposer (75g ou 150g). Une extension de la situation de transfert d'une main dans l'autre est réalisée dans le paradigme dit « *du garçon de café* » où il s'agit de charger et décharger avec une main un plateau maintenu par l'autre. Cette situation permet de comparer deux conditions de délestage (lestage) du bras, soit il est effectué par le sujet lui-même (délestage volontaire), soit il est fait par l'expérimentateur (délestage imposé). Le contrôle anticipé du bras tenant le plateau lors du délestage volontaire est noté dès 3 ans 6 mois (Schmitz, Martin et Assaiante, 1999 ; Schmitz, Martin et Assaiante, 2002). A 5-6 ans, l'APA mesuré lors du délestage actif du dispositif dépend du poids de l'objet présenté : 250g ou 450g (Schmitz, Assaiante et Gepner, sous presse).

Les études sur la préparation à la saisie montrent que l'identification visuelle d'un objet familier active, chez l'adulte, une représentation mnésique précise de son poids permettant, dès le 1er essai, une programmation adéquate de la force de la pince pouce/index (Gordon, Westling, Cole et Johansson, 1993). Chez l'enfant, la prise en compte du poids 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 dans la régulation de la force de prise pouce/index (Forssberg et al., 1992). 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 autre identique mais de poids différent ; autour de 9-10 mois au niveau proximal (Mounoud, 1973 ; Mounoud et al., 1974) et entre 12 et 24 mois au niveau distal (Bower, 1978 ; Forssberg et al., 1992). Enfin, l'ajustement anticipé du mouvement selon le poids dépend progressivement de la taille et de la familiarité des objets (Gordon, Forssberg, Johansson et Westling, 1991). Ainsi, la prise en compte des changements de taille dans une tâche de sériation apparaît nettement autour de 3 ans 5 mois (Hauert, 1980 ; Hauert, Mounoud et Mayer, 1981 ; Gordon, Forssberg, Johansson, Eliasson et Westling, 1992) et s'améliore jusqu'à 9 ans (Gachoud, Mounoud et Hauert, 1983). En définitive, l'organisation anticipée du geste prend en compte les propriétés des objets qui ne sont pas directement accessibles par la vision en mobilisant un processus complexe dont le développement s'étale sur une dizaine d'années.

L'ensemble de ces études précise que les APA ont une forme immature à leur émergence. Celle-ci se traduit notamment par une variabilité intra individuelle très importante : les activations musculaires ne sont pas systématiques et peu reproductibles. En outre, les synergies impliquées sont peu différenciées : les patterns musculaires consistent majoritairement en des co-contractions d'amplitude parfois très importante. Enfin, 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. Le réglage de la préparation posturale est donc lent et la forme des APA atteint rarement celle observée chez l'adulte dans les groupes d'enfants étudiés.

Considérant que la question de l'intégration du poids de l'objet dans l'organisation de l'action n'a jamais été explorée en termes d'anticipation posturale, la présente étude analyse l'effet de la connaissance préalable du poids de l'objet dans une tâche de lestage inspirée du paradigme du garçon de café.

Méthode

Procédure

L'enfant est debout avec le bras droit fléchi et l'avant-bras à l'horizontale. Un plateau de 12 cm de diamètre est posé sur la main en pronation et maintenu sur la paume par un élastique. L'expérimentateur centre l'attention de l'enfant sur l'objet qu'il tient et dépose sur le plateau en invitant l'enfant à maintenir son bras immobile. La phase durant laquelle les objets tests sont présentés est toujours précédée d'une phase de familiarisation à la tâche afin d'éviter un possible effet de surprise.

L'enfant est filmé de profil pendant toute la durée de l'expérience. Le film est ensuite numérisé et les coordonnées (X, Y) de points marqués sur le poignet (extrémité inférieure externe du radius), le coude (épicondyle) et le bras (base du deltoïde) sont relevées à une fréquence de 25Hz (logiciel 3Clic, Cordier, 2001). Ces trois points forment l'angle du coude dont nous mesurons les variations autour de sa valeur d'origine 0 au moment du contact entre le plateau et l'objet (t_0). L'indice ΔAng est exprimé en degrés et rend compte de l'extension (valeurs positives) ou de la flexion (valeurs négatives) du coude en référence à sa position à t_0 . Les valeurs moyennes de ΔANG sont calculées, pour chaque sujet, sur 3 intervalles temporels successifs de 200ms avant le lestage et 4 intervalles successifs de 200ms après le lestage. Cette fenêtre temporelle permet d'évaluer la préparation posturale (600 ms) et les effets déstabilisants du lestage (800 ms). L'analyse statistique applique une analyse de variance (MANOVA) et des tests post-hoc (test de Newman-Keuls) effectués par le logiciel Statistica ; dont le plan comprend le groupe d'âge, l'intervalle temporel et l'essai de lestage comme facteurs.

Les situations successives proposées aux enfants sont destinées à mettre à l'épreuve l'hypothèse que la préparation posturale se traduit par une flexion du coude, c'est-à-dire par le développement d'un vecteur force de direction inverse à la perturbation posturale à venir et d'amplitude proportionnelle à celle-ci. La deuxième hypothèse admet que la connaissance du poids de l'objet rend possible la préparation posturale ajustée et donc une meilleure stabilité de l'angle du coude après le lestage.

Effet de la manipulation et de la répétition du lestage avec un objet identique

Nous avons proposé la tâche de lestage de plateau à un groupe de 65 enfants droitiers usuels regroupés en 4 groupes d'âge : groupe 1 (21-25 mois), groupe 2 (26-30 mois), groupe 3 (31-35 mois) et groupe 4 (36-40 mois)

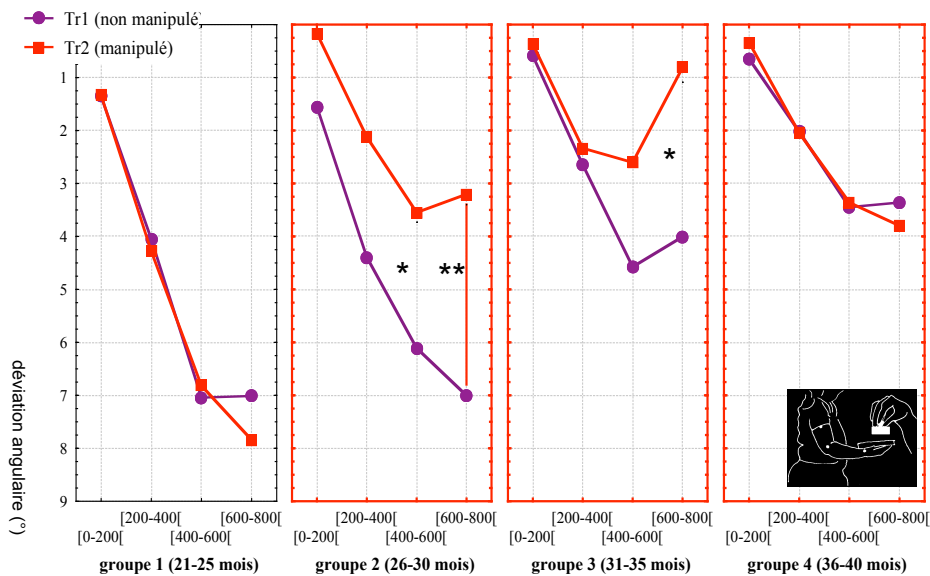
L'effet de la connaissance du poids des objets est testé en comparant deux essais de lestage avec une boîte de 100g. Lors du premier essai, l'objet n'a pas été manipulé auparavant par l'enfant. En revanche, l'enfant est amené à manipuler la boîte avant le second essai, en le déposant lui-même sur le plateau. Ainsi, l'essai 2 diffère de l'essai 1 par l'expérience de soulèvement de l'objet propice à évaluer proprioceptivement son poids.

L'analyse de la cinématique de l'angle du coude indique qu'une flexion significative du coude apparaît systématiquement durant les 600ms qui précèdent le lestage, dans les deux conditions (effet de l'intervalle, $F(2,120) = 42,82$, $p < .0001$). Cette déviation témoigne d'une préparation posturale au lestage consistant au développement d'une force verticale opposée à la perturbation posturale qu'induit mécaniquement la surcharge du plateau posée sur la main de l'enfant. Cette préparation ne dépend ni de l'âge ni de l'essai.

Le lestage du plateau est suivi d'une extension significative du coude ($F(3,162) = 44,79$, $p < .001$). L'amplitude de cette perturbation posturale diminue avec l'âge des enfants ($F(3,54) = 3,57$, $p < .05$). Le contrôle de la position du bras postural est notamment amélioré dans la

partie tardive de la perturbation puisque la différence entre les groupes d'âge s'amplifie au cours des intervalles temporels qui suivent le lestage (effet age x intervalle $F(9,162) = 2,51, p < .05$).

La différence entre les conditions 1 et 2 n'est pas significative sur l'ensemble du groupe. Le graphique 1 illustre que les enfants du groupe 1 (21-25 mois) sont ceux qui montrent l'extension la plus marquée dans les deux conditions. A cet âge, la stabilisation du coude n'est pas optimisée par la manipulation préalable de l'objet. Dans les deux groupes suivants (groupe 2 : 26-30 mois et groupe 3 : 31-36 mois), le fait de manipuler l'objet engendre un meilleur contrôle de la position du bras après le lestage. En effet, la différence entre les conditions 1 et T2 apparaît significative à l'analyse post-hoc sur deux intervalles temporels dans le groupe 2 ([400 ; 600] $p < .05$ et [600 ; 800] $p < .01$) et sur un intervalle dans le groupe 3 ([600 ; 800], $p < .05$). Enfin, dans le groupe 4, la différence entre les deux conditions Tr1 et Tr2 n'est pas statistiquement significative et ne permet pas de conclure.



Graphique 1 : Déviation angulaire du coude au cours des intervalles suivant le lestage du plateau et selon les groupes d'âge. Notons que dans le groupe d'âge le plus jeune et le groupe le plus avancé, la différence entre les deux essais est minimale. Dans les groupes 2 et 3, l'analyse post-hoc met à jour des différences entre les conditions : *= $p < .05$, **= $p < .01$.

Ces résultats indiquent que la manipulation préalable de l'objet proposé lors du lestage n'a pas le même effet selon l'âge des enfants. Dans le premier groupe, l'apport d'information ne semble pas améliorer la stabilisation du coude, ce qui s'accorde avec un fonctionnement principalement rétroactif du contrôle postural dans des tâches distales avant 2 ans (Eliasson et al., 1995). Dans le deuxième et le troisième groupe, le progrès du contrôle de la position du coude est significatif lorsque le lestage est précédé de la manipulation (2). La troisième année correspond à la mise en place de l'utilisation proactive des connaissances relatives au poids des objets dans le contrôle anticipé de la posture. Enfin, le groupe d'enfants âgés de 3 ans révolus présente la particularité de ne pas montrer de bénéfice de la manipulation de l'objet sur le contrôle de la position du coude. C'est toutefois dans ce groupe que la stabilité de l'articulation est la plus nette dès le premier essai.

On peut en conclure qu'à partir de 2 ans 6 mois, l'enfant a recours à un contrôle anticipé de la stabilité du coude dès le premier essai Tr1. Cette anticipation repose sur une estimation « visuelle » du poids de l'objet. Dans le groupe 3, cette estimation est « mise à jour » après manipulation et permet un meilleur contrôle de la stabilité du coude lors de l'essai subséquent. Dans le groupe 4, les enfants semblent avoir rigidifié leur articulation de façon anticipée afin de ne pas autoriser une extension trop ample, sans tenir compte de la possibilité d'actualiser la connaissance du poids de l'objet. Cette stratégie, reposant sur des co-contractions musculaires a déjà été notée au cours du développement moteur et postural à des étapes clés du développement (Bernstein, 1967 ; Gachoud et al., 1983 ; Hadders-Algra et Prechtl, 1992 ; Assaiante et Amblard, 1995).

Effet du lestage avec un objet identique mais de poids différent (effet d'un leurre)

La réaction à la substitution d'un objet par un autre de poids identique a été largement utilisée dans des tâches de saisie manuelle pour vérifier le recours anticipé à une représentation de cette propriété de l'objet (Mounoud, 1973 ; Mounoud et al., 1974 ; Hauert, 1980 ; Hauert et al., 1981 ; Forssberg et al., 1992). Nous avons utilisé la tâche de lestage dans une procédure de leurre chez des enfants de plus de 30 mois ; c'est-à-dire à l'âge où ils ont le plus probablement recours au contrôle anticipé de la posture. L'hypothèse est que l'anticipation du poids se manifeste par une altération de la performance lors de l'introduction du leurre alors qu'une absence de réaction indique un contrôle rétroactif de la posture.

La procédure consiste à comparer deux groupes d'enfants contrastés sur leur attente concernant le poids qui est lesté. Une situation de leurre a été proposée à 20 enfants droitiers de plus de 30 mois distribués en deux groupes.

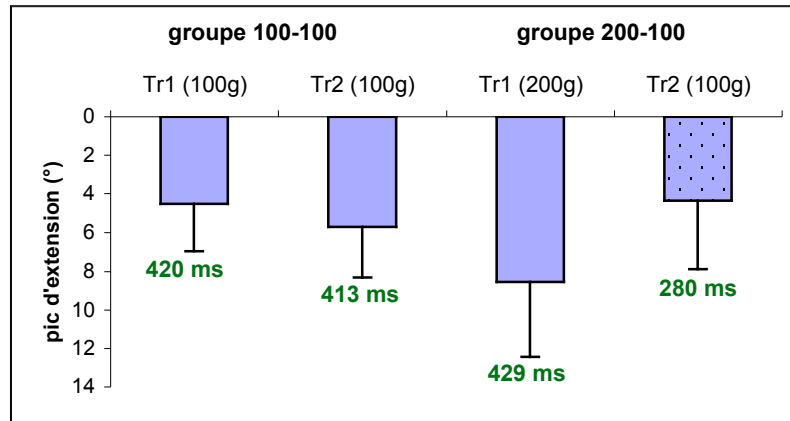
Les enfants du groupe expérimental (groupe 200-100) manipulent une boîte de 200g qui est ensuite déposée sur le plateau par l'expérimentateur une première fois (Tr1), retirée, puis échangée discrètement avec une boîte identique en forme de 100g qui est posée sur le plateau dans les mêmes conditions (Tr1). Dans le groupe contrôle (groupe 100-100), la boîte de 100g est systématiquement présentée (Tr1 et Tr2).

Comme dans l'étude précédente, le lestage est précédé d'une flexion du coude durant les 600ms qui précèdent le lestage (effet de l'intervalle, $F(2,36) = 34,89$, $p < .0001$). Nous observons aussi toutefois une amplification significative de cette préparation dans le second essai comparativement à l'essai 1 (intervalle x condition, $F(2,36) = 4,16$, $p < .05$). L'analyse post-hoc révèle ainsi que le coude est plus éloigné de sa position à t_0 dans l'intervalle] 600ms, 400ms] avant le second essai.

L'extension du coude consécutive au lestage diffère selon que l'objet pèse 100g ou 200g. Nous avons étudié le maximum de cette extension dans l'intervalle [0, 600[ms et la date de son apparition (graphique 2). Les résultats montrent que l'amplitude du pic d'extension dépend de l'interaction groupe x essai ($F(1,18) = 15,03$, $p < .005$). L'analyse post-hoc signale que cet effet est à attribuer à l'essai avec 200g (Tr1 du groupe 200-100) qui diffère significativement de tous les autres essais. Les essais effectués avec l'objet de 100g, en revanche, ne diffèrent pas significativement entre eux. Le poids de l'objet paraît *a priori* être déterminant dans l'amplitude de l'extension de coude. L'analyse statistique appliquée à la date de ce maximum montre aussi un effet d'interaction groupe x essai ($F(1,18) = 4,75$, $p < .05$). Toutefois, l'analyse post hoc montre que le délai d'apparition du pic d'extension diffère, cette fois-ci, dans l'essai leurre (Tr2 du groupe 200-100) comparé à tous les autres essais.

Ces résultats indiquent que l'amplitude du pic d'extension dépend du poids de l'objet mais que son délai repose sur les attentes des enfants. Dans l'essai leurre (Tr2) du groupe 200-100, les résultats admettent qu'une préparation posturale à la réception d'un poids de 200g a eu lieu. Le poids de l'objet posé sur le plateau ne correspondant pas à celui attendu, et la force de résistance

au lestage étant supérieure à celle développée pour un poids de 100g, l'extension est plus brusque et son maximum est atteint beaucoup plus rapidement. Au delà de ce résultat, l'analyse qualitative des trajectoires d'extension du coude révèle un véritable effet perturbateur du lestage du leurre sur la stabilisation du coude.



Graphique 2 : Variation de l'amplitude et du délai du pic d'extension consécutif au lestage du plateau dans chacun des essais.

Ce résultat conforte l'hypothèse de l'intervention de la connaissance du poids des objets dans l'organisation anticipée de la posture chez des enfants de 30 mois et plus. En effet, nous observons, comme dans les tâches de saisie, que la substitution d'un objet par un autre identique mais de poids différent induit une perturbation de la trajectoire du mouvement (Mounoud, 1973 ; Mounoud et *al.*, 1974 ; Forssberg et *al.*, 1992).

Conclusions

Les deux études présentées ici apportent des arguments pour conclure que la connaissance du poids de l'objet permet un ajustement de l'anticipation posturale du jeune enfant de 20 à 40 mois. En effet, alors que la fonction de l'anticipation posturale, qui consiste à limiter les perturbations consécutives à une perturbation à venir, pourrait impliquer que le coude reste stable malgré la différence de poids entre les objets utilisés pour lester le plateau, nous avons observé que le lestage avec un poids deux fois plus lourd induit une extension deux fois plus ample, même si l'enfant a préalablement manipulé l'objet.

La possibilité de manipuler l'objet entre deux essais de lestage fournit à l'enfant l'occasion de construire ou d'actualiser en action, une représentation de son poids (Hauert, 1980). Dans notre étude, la manipulation de l'objet et la répétition du lestage ont un effet différent selon l'âge des enfants. Avant deux ans, les résultats concordent avec ceux observés dans la saisie (Forssberg et *al.*, 1991), en révélant un contrôle rétroactif de la position du coude dont l'efficacité n'est pas améliorée par la connaissance du poids de l'objet. Au cours de la troisième année, et toujours en accord avec les recherches sur la saisie pouce/index, le contrôle de la position du coude est optimisé par la manipulation préalable de l'objet. Il est intéressant de noter qu'à partir de 2 ans 6 mois, les perturbations consécutives au lestage sont limitées dès le premier essai comparativement aux enfants plus jeunes. Nous considérons que l'enfant contrôle la stabilité du coude de façon anticipée dès le premier essai, à partir d'une estimation du poids de l'objet. Alors

qu'avant 3 ans, cette estimation est actualisée après manipulation et permet un meilleur contrôle de la stabilité du coude lors de l'essai subséquent, un phénomène différent apparaît à partir de 3 ans. L'extension du coude est limitée par rapport aux enfants plus jeunes dès le premier essai et la stabilité n'est pas améliorée par la connaissance du poids de l'objet. Ce résultat correspond, selon nous, à une modification de stratégie chez ces enfants qui paraissent recourir à une *rigidification* proactive de la position, indépendamment des informations qui leur sont fournies (Bernstein, 1967 ; Gachoud *et al.*, 1983 ; Hadders-Algra *et al.*, 1992 ; Assaiante *et al.*, 1995 ; Bertenthal, Rose et Bai, 1997). Le développement du contrôle proactif de la posture n'est donc pas monotone à l'instar du développement du contrôle du mouvement (Hay, 1984).

Le second paradigme a utilisé une situation de leurre. Nous avons testé l'effet de l'introduction d'un leurre pour un groupe d'enfants de plus de 2;6 ans, c'est-à-dire à un âge où nous avons observé l'ajustement anticipé de la posture. Les déviations posturales consécutives au lestage sont plus brusques dans le groupe leurré comparativement au groupe contrôle. La surestimation anticipée du poids de l'objet se traduit par le développement d'une force anticipée trop importante au niveau du coude. Ces résultats attestent que l'introduction d'un leurre modifie la dynamique de la perturbation posturale, ce qui correspond aux résultats de Hauert et collaborateurs (1981) et de Forssberg et collaborateurs (1992).

En conclusion, il apparaît que les connaissances portant sur les propriétés des objets, ici le poids, sont intégrées dans l'organisation de l'anticipation posturale à peu près au même âge qu'elles le sont dans l'organisation du mouvement volontaire. Cette observation confirme l'hypothèse de Forssberg et collaborateurs (1999) sur la communauté de représentations des propriétés des objets, entre contrôle du mouvement et contrôle de la posture. La troisième année paraît constituer une étape clé au cours de laquelle s'installe le contrôle anticipé de la posture dans une situation d'anticipation externe. Ainsi, avant 2 ans, l'enfant privilégie un mode de contrôle rétroactif alors qu'à l'approche des 3 ans, les connaissances de l'enfant sont intégrées à la préparation posturale de façon proactive et permettent de mieux limiter les perturbations posturales consécutives au lestage. Ce constat permet d'étendre au jeune enfant les conclusions admises chez l'adulte selon lesquelles la connaissance du poids des objets est une partie fondamentale du paramétrage de l'APA (Commissaris *et al.*, 1997).

Références

- Aruin, A. S., Forrest, W. R., et Latash, M. L. (1998). Anticipatory postural adjustments in conditions of postural instability. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 109, 350-9.
- Aruin, A. S. et 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, 497-503.
- Aruin, A. S., Ota, T., et Latash, M. L. (2001). Anticipatory postural adjustments associated with lateral and rotational perturbations during standing. *Journal of Electroencephalography and Kinesiology*, 11, 39-51.
- Aruin, A. S., Shiratori, T., et Latash, M. L. (2001). The role of action in postural preparation for loading and unloading in standing subjects. *Experimental Brain Research*, 138, 458-466.
- Assaiante, C. et Amblard, B. (1995). An ontogenetic model for the sensori motor organization of balance control in humans. *Human Movement Science*, 14, 13-43.
- Assaiante, C., Woollacott, M. H., et Amblard, B. (2000). Development of postural adjustment during gait initiation: Kinematic and EMG analysis. *Journal of Motor Behavior*, 32, 211-26.
- Barela, J. A., Jeka, J. J., et Clark, J. E. (1999). The use of somatosensory information during the acquisition of independent upright stance. *Infant Behavior and Development*, 22, 87-102.

- Bernstein, N. A. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Oxford: Pergamon Press.
- Bertenthal, B. I., Rose, J. L., et Bai, D. L. (1997). Perception-action coupling in the development of visual control of posture. *Journal of experimental psychology : human perception and performance*, 23, 1631-43.
- Bertenthal, B. I. et von Hofsten, C. (1998). Eye, head and trunk control: The foundation for manual development. *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 22, 515-20.
- Bouisset, S. et Zattara, M. (1981). A sequence of postural movements precedes voluntary movement. *Neuroscience Letters*, 22, 263-270.
- Bower, T. G. R. (1978). La notion d'objet : les yeux, les mains et la parole. In H.Hecaen et M. Jeannerod (Eds.), *Du contrôle moteur à l'organisation du geste* (pp. 158-167). Paris: Masson.
- Brenière, Y., Bril, B., et 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, 20-37.
- Buekers, M., Pauwels, J., et Meugens, P. (1988). Temporal and spatial anticipation in twelve-years-old boys and girls. In A.Colley et J. Beech (Eds.), *Cognition and action in skilled behaviour* (pp. 283-292). Amsterdam: Elsevier Science Publishers B. V.
- Bushnell, E. W. et Boudreau, J. P. (1998). Exploring and exploiting objects with the hands during infancy. In K.Connolly (Ed.), *The psychobiology of the hand* (pp. 144-161). London: Mac Keith Press.
- Cordier, A. (2001). *Logiciel 3Clic*. Université de Rouen.
- Commissaris, D. A. C. et Toussaint, H. M. (1997). Load knowledge affects low-back loading and control of balance in lifting tasks. *Ergonomics*, 40, 559-75.
- Eliasson, A.-C., Forssberg, H., Ikuta, K., Apel, I., Westling, G., et Johansson, R. S. (1995). Development of human precision grip. V. Anticipatory and triggered grip actions during sudden loading. *Experimental Brain Research*, 106, 425-33.
- Flanagan, J. R. (1996). Action-perception coupling in judgments of hand-held loads. In A.M.Wing, P. Haggard, et J. R. Flanagan (Eds.), *Hand and Brain : The Neurophysiology and psychology of hand movements* (pp. 415-430). San Diego: Academic Press.
- Forssberg, H., Eliasson, A.-C., Kinoshita, H., Johansson, R. S., et Westling, G. (1991). Development of human precision grip. I: Basic coordination of force. *Experimental Brain Research*, 85, 451-7.
- Forssberg, H., Jucaite, A., et 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.
- Forssberg, H., Kinoshita, H., Eliasson, A.-C., Johansson, R. S., Westling, G., et Gordon, A. M. (1992). Development of human precision grip. II. Anticipatory control of isometric forces targeted for object's weight. *Experimental Brain Research*, 90, 393-8.
- Gachoud, J. P., Mounoud, P., et Hauert, C.-A. (1983). Motor strategies in lifting movements: A comparison of adult and child performance. *Journal of Motor Behavior*, 15, 202-216.
- Gordon, A. M., Forssberg, H., Johansson, R. S., Eliasson, A. C., et Westling, G. (1992). Development of human precision grip. III. Integration of visual size cues during the programming of isometric forces. *Experimental Brain Research*, 90, 399-403.
- Gordon, A. M., Westling, G., Cole, K. J., et Johansson, R. S. (1993). Memory representations underlying motor commands used during manipulation of common and novel objects. *Journal of Neurophysiology*, 69, 1789-96.
- Gordon, A. M., Forssberg, H., Johansson, R. S., et Westling, G. (1991). Visual size cues in the programming of manipulative forces during precision grip. *Experimental Brain Research*, 83.

- Haas, G., Diener, H. C., Rapp, H., et Dichgans, J. (1989). Development of feedback and feedforward control of upright stance. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 31, 481-8.
- Hadders-Algra, M. et Prechtl, H. F. R. (1992). Developmental course of general movements in early infancy.II. EMG correlates. *Early Human Development*, 28, 231-251.
- Hauert, C.-A. (1980). Propriétés des objets et propriétés des actions chez l'enfant de 2 à 5 ans. *Archives de Psychologie*, 48, 95-168.
- Hauert, C.-A., Mounoud, P., et 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. (1984). Discontinuity in the development of motor control in children. In W.Prinz et A. F. Sanders (Eds.), *Cognition and motor processes* (pp. 351-360). Berlin: Springer Verlag.
- Hay, L. et Redon, C. (1999). Feedforward versus feedback control in children and adults subjected to a postural disturbance. *Experimental Brain Research*, 125, 153-62.
- Hay, L. et Redon, C. (2001). Development of postural adaptation to arm raising. *Experimental Brain Research*, 139, 224-32.
- Hugon, M., Massion, J., et Wiesendanger, M. (1982). Anticipatory postural changes induced by active unloading and comparison with passive unloading in man. *Pflugers Archiv*, 393, 292-6.
- Johansson, R. S. (1996). Sensory control of dexterous manipulation in humans. In A.M.Wing, P. Haggard, et J. R. Flanagan (Eds.), *Hand and Brain : The neurophysiology and psychology of hand movements* (pp. 381-414). San Diego: Academic Press.
- Johansson, R. S. et Westling, G. (1988). Coordinated isometric muscle commands adequately and erroneously programmed for the weight during lifting task with precision grip. *Experimental Brain Research*, 71, 59-71.
- Jones, L. (1996). Proprioception and its contribution to manual dexterity. In A.M.Wing, P. Haggard, et J. R. Flanagan (Eds.), *Hand and Brain : The Neurophysiology and psychology of hand movements* (pp. 349-362). San Diego: Academic Press.
- Jover, M. (2002). *L'ajustement postural anticipé entre 2 et 4 ans : développement et anticipation du poids des objets*. Thèse de Doctorat de Psychologie. Université de Rouen.
- Lacquaniti, F. et Maioli, C. (1987). Anticipatory and reflex coactivation of antagonist muscles in catching. *Brain Research*, 406, 373-8.
- Lacquaniti, F. et Maioli, C. (1989a). Adaptation to suppression of visual information during catching. *Journal of Neuroscience*, 9, 149-59.
- Lacquaniti, F. et Maioli, C. (1989b). The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching. *Journal of Neuroscience*, 9, 134-48.
- Latash, M. L., Aruin, A. S., Neyman, I., et Nicholas, J. J. (1995). Anticipatory postural adjustments during self inflicted and predictable perturbations in Parkinson's disease. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 58, 326-34.
- Latash, M. L., Aruin, A. S., Neyman, I., Nicholas, J. J., et Shapiro, M. B. (1995). Feedforward postural adjustments in a simple two-joint synergy in patients with Parkinson's disease. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 97, 77-89.
- Ledebt, A., Bril, B., et Brenière, Y. (1998). The build-up of anticipatory behaviour. An analysis of the development of gait initiation in children. *Experimental Brain Research*, 120, 9-17.
- Massion, J. (1992). Movement, posture and equilibrium: Interaction and coordination. *Progress in Neurobiology*, 38, 35-56.
- McCloskey, D. I. (1974). Muscular and cutaneous mechanisms in the estimation of the weights of grasped objects. *Neuropsychologia*, 12, 513-20.
- Mounoud, P. (1973). Les conservations physiques chez les bébés. *Bulletin de Psychologie*, 312, 722-728.
- Mounoud, P. et Bower, T. G. R. (1974). Conservation of weight in infants. *Cognition*, 3, 29-40.

- Riach, C. L. et Hayes, K. C. (1990). Anticipatory postural control in children. *Journal of Motor Behavior*, 22, 250-266.
- Schmitz, C., Martin, N., et Assaiante, C. (1999). Development of anticipatory postural adjustments in a bimanual load- lifting task in children. *Experimental Brain Research*, 126, 200-4.
- Schmitz, C. et Assaiante, C. (2002). Developmental sequence in the acquisition of anticipation during a new co-ordination in a bimanual load-lifting task in children. *Neuroscience Letters*, 330, 215-218.
- Schmitz, C., Martin, N., et 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, 354-64.
- Schmitz, C., Martineau, J., Barthelemy, C., et Assaiante, C. (2003). Motor control and children with autism: deficit of anticipatory function? *Neuroscience Letters*, 348, 17-20.
- Schmitz, C., Assaiante, C., et Gepner, B. (sous presse). Modulation de la réponse anticipée en fonction du poids à déléster : étude chez l'enfant sain et l'enfant autiste. *Rapport TIPA*.
- Scholz, J. P. et Latash, M. L. (1998). A study of bimanual synergy associated with holding an object. *Human Movement Science*, 17, 753-779.
- Shiratori, T. et Latash, M. L. (2001). Anticipatory postural adjustments during load catching by standing subjects. *Clinical Neurophysiology*, 112, 1250-1265.
- Shumway-Cook, A. et Woollacott, M. H. (1995). *Motor control. Theory and practical applications*. Baltimore (Maryland): Williams and Wilkins.
- Toussaint, H. M., Michies, Y. M., Faber, M. N., Commissaris, D. A. C., et 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, 85-94.
- van der Fits, I. B. et Hadders-Algra, M. (1998). The development of postural response patterns during reaching in healthy infants. *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 22, 521-6.
- van der Fits, I. B., Otten, E., Klip, A. W., Van Eykern, L. A., et 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, 517-28.
- von Hofsten, C. (1984). Developmental changes in the organization of pre reaching movements. *Developmental Psychology*, 20, 378-388.
- von Hofsten, C. (1993). Prospective control: A basic aspect of action development. *Human Development*, 36, 253-270.
- von Hofsten, C. et Woollacott, M. H. (1989). Anticipatory postural adjustments during infants reaching. *Neuroscience Abstracts*, 15, 1199.
- Witherington, D. C., von Hofsten, C., Rosander, K., Robinette, A., Woollacott, M. H., et Bertenthal, B. I. (2002). The development of anticipatory postural adjustments in infancy. *Infancy*, 3, 495-517.