



HAL
open science

Développement de l'anticipation posturale chez l'enfant sain et pathologique: revue de travaux

Marianne ´ Jover, Christina Schmitz, Emmanuelle Bosdure, Brigitte Chabrol, Christine Assaiante

► To cite this version:

Marianne ´ Jover, Christina Schmitz, Emmanuelle Bosdure, Brigitte Chabrol, Christine Assaiante. Développement de l'anticipation posturale chez l'enfant sain et pathologique: revue de travaux. A.N.A.E. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant, 2005. hal-01792526

HAL Id: hal-01792526

<https://hal.science/hal-01792526>

Submitted on 14 Feb 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Développement de l'anticipation posturale chez l'enfant sain et pathologique : revue de travaux

M. JOVER*, C. SCHMITZ*, E. BOSDURE**,
B. CHABROL*, **, C. ASSAIANTE*

* Groupe Développement et pathologie de l'action, CNRS-UMR 6196, 31, chemin Joseph-Aiguier, F-13402 Marseille Cedex 20.
** Unité de médecine infantile, CHU Timone Enfants, F-13385 Marseille Cedex 05.

RÉSUMÉ : *Développement de l'anticipation posturale chez l'enfant sain et pathologique : revue de travaux*

Cet article présente, après une brève définition des principes et fonctions de l'anticipation posturale, une revue des recherches portant sur leur développement dans des tâches globales et segmentaires. Les recherches menées par notre équipe permettent d'appréhender le développement des ajustements posturaux anticipés (APA) à travers une tâche de coordination bimanuelle dans laquelle un bras a une fonction motrice et l'autre une fonction posturale (paradigme du garçon de café). Ce paradigme a également été étudié dans deux pathologies développementales afin d'approfondir les mécanismes impliqués dans la mise en place de la fonction d'anticipation chez l'enfant : l'autisme, qui résulte d'une atteinte du développement du système nerveux central, et la dystrophie musculaire de Duchenne (DMD) qui, à l'inverse, est caractérisée par une atteinte du développement du système moteur périphérique. Nos résultats montrent que les enfants autistes ont un déficit de la fonction d'anticipation qui se traduit par un recours au contrôle rétroactif de la posture et l'absence d'activation corticale EEG liée à l'anticipation comme chez les enfants contrôles. Inversement, les enfants DMD ne présentent pas d'altération de la fonction d'anticipation même si leur faiblesse musculaire limite l'efficacité de leurs APA. Ces résultats confirment la place fondamentale de la construction et de l'utilisation des représentations dans le développement de l'anticipation posturale.

Mots clés : Ajustement postural anticipé — Développement — Coordination motrice — Autisme — Dystrophie musculaire de Duchenne.

SUMMARY : *Development of postural anticipation in both healthy and pathological children : an overview of work*

After a brief definition of the principles and functions of postural anticipation, this article presents an overview of research dealing with their development in global and segmented tasks. The research carried out by our team helps understand the development of anticipatory postural adjustments (APA) through a bimanual coordination task in which one arm has a motor function and the other a postural function (waiter paradigm). This paradigm has also been studied in two developmental pathologies in order to learn more about the mechanisms involved in the development of the function of anticipation in children : autism, which results from an impairment in the development of the central nervous system, and Duchenne muscular dystrophy (DMD) which, on the contrary, is characterised by impaired development of the peripheral motor system. Our results show that autistic children suffer from a deficient anticipation function which makes them reliant on retroactive control of posture and reveals the absence of EEG cortical activation linked to anticipation which is present in control children. Inversely, DMD children do not present any alteration in the anticipation function, even if their muscular weakness limits the effectiveness of their APA. These results confirm the fundamental role of the construction and use of representations in the development of postural anticipation.

Key words : Anticipatory postural adjustment — Development — Motor coordination — Autism — Duchenne muscular dystrophy.

RESUMEN : Desarrollo de la anticipación postural para el niño sano y patológico : revista de las investigaciones

Este artículo presenta, después de una breve definición de principios y funciones de la anticipación postural, una revista de las investigaciones que tratan del desarrollo en tareas globales y segmentarias. Las investigaciones llevadas a cabo por nuestro equipo permiten de comprender el desarrollo de los ajustes posturales anticipados (APA) a través de una tarea de coordinación bimanual en la cuál un brazo tiene una función motriz y el otro una función postural (el paradigma del camarero). Ese paradigma se ha estudiado también en dos patologías del desarrollo con el fin de profundizar los mecanismos puestos en obra en la materialización de la función de anticipación del niño : el autismo, que resulta de una alteración del sistema nervioso central, y la distrofia muscular de Duchenne (DMD) que, al opuesto, está caracterizada por una alteración del sistema motor periférico. Nuestros resultados demuestran que los niños autistas sufren de un déficit de la función de anticipación que se caracteriza por el recurso al control retroactivo de la postura y la ausencia de activación cortical EEG liada a la anticipación como los niños control. Sin embargo, los niños DMD no sufren de una alteración de la función de anticipación aunque la flojeza muscular afecta la eficacia de su APA. Estos resultados corroboran el papel fundamental de la construcción y de la utilización de representaciones en el desarrollo de la anticipación postural.

Palabras clave : Ajuste postural anticipado — Desarrollo — Coordinación motriz — Autismo — Distrofia muscular de Duchenne.

PRINCIPES ET FONCTIONS DE L'ANTICIPATION POSTURALE

Le contrôle de la posture assure une position érigée, mais permet également d'orienter le corps et de fournir un cadre de référence pour percevoir, agir et interagir avec l'environnement. Chacune de nos actions motrices résulte d'une coordination fine entre posture et mouvement. En effet, le système moteur en action doit concilier deux objectifs antagonistes : déplacer les segments corporels désirés et stabiliser sa position pour que le geste n'entraîne pas de déséquilibre. Hess (1943) a formalisé l'idée d'un soutien postural associé au mouvement volontaire en termes de composantes téléocinétique (mouvement) et éréismatique (soutien) de l'action, profondément enchevêtrées. Le contrôle postural est ainsi fondamental à la fois pour soutenir, 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 équilibre sont rétroactifs. Ils interviennent immédiatement après la perturbation de la posture et reposent sur des mécanismes réflexes (Horak et Nashner, 1986 ; Forssberg et Hirschfeld, 1994). *A contrario*, dans les conditions habituelles d'exécution d'un geste volontaire, la posture est contrôlée par anticipation à l'aide des ajustements posturaux anticipés (APA).

Les APA consistent en une séquence d'activations et d'inhibitions musculaires qui précède une perturbation posturale ou un mouvement. Ils ont pour fonction : 1 / d'assurer une préparation posturale préalable à la réalisation d'un mouvement ; 2 / d'assurer l'équilibre et de maintenir la posture ; 3 / d'assurer l'assistance au mouvement en termes de force ou de vitesse (Massion, 1992 ; 1997). Ces ajustements peuvent être localisés dans l'ensemble du corps ou bien sur un segment corporel. Les APA sont généralement associés aux mouvements volontaires : l'élévation rapide des bras (Bouisset et Zattara, 1981) ou la flexion du tronc (Oddsson, 1990). Il arrive également qu'ils apparaissent lorsqu'une perturbation posturale est prévisible, comme dans le cas d'un

déplacement sinusoïdal du support sur lequel se tient le sujet (Dietz, Trippel, Ibrahim, et Berger, 1993) ou bien lors de la réception d'un objet en chute libre (Lacquaniti et Maioli, 1987 ; Shiratori et Latash, 2001). L'acquisition des APA reposerait, selon un large consensus, sur la transformation de corrections posturales consécutives à une perte de stabilité, en ajustements anticipés associés au mouvement ; soit le passage d'un contrôle rétroactif vers un contrôle proactif sur la base de l'expérience (Massion, 1992 ; Lacquaniti, Maioli, Borghese, et Bianchi, 1997).

Le contrôle anticipé de l'action repose nécessairement sur une représentation du corps et de ses propriétés biomécaniques (schéma corporel, géométrie et cinétique des segments corporels), mais aussi sur une représentation de l'environnement et du contexte dans lequel l'action est exécutée (force gravitaire, obstacles, propriétés des objets...). La finalité du système moteur est de prédire les interactions entre les contraintes internes et externes afin de produire l'acte moteur le plus approprié (Paillard, 1985). Ce principe peut être transposé au contrôle anticipé de la posture dont l'organisation implique nécessairement les représentations du sujet sur lui-même et sur son environnement afin de prédire les répercussions d'un événement sur la stabilité posturale.

DÉVELOPPEMENT DE L'ANTICIPATION POSTURALE CHEZ L'ENFANT SAIN

Il est classiquement admis que le contrôle proactif ou anticipé des actions apparaît et se développe plus tardivement que le contrôle rétroactif (Bernstein, 1967 ; Forssberg et Nashner, 1982 ; Von Hofsten, 1993). Pour ce qui est du contrôle postural, les enfants disposeraient à la naissance d'un répertoire inné de synergies, au cœur duquel seraient sélectionnées et stabilisées des réactions posturales (Sporns et Edelman, 1993 ; Hadders-Algra, Brogren, et Forssberg, 1996). Ce réseau serait également celui qui est mobilisé pour les premières anticipations posturales (Hirschfeld et Forssberg, 1994 ; Massion, 1998). En fonction du dévelop-

pement des représentations, la transformation de corrections rétroactives en corrections anticipées pourrait ensuite se construire et se développer. Il est toutefois important de considérer que le contrôle rétroactif n'est pas complètement mature lorsque le contrôle proactif apparaît, et que les deux modes de contrôle continuent à se développer progressivement tout au long de l'enfance, en s'alimentant mutuellement (Shumway-Cook et Woollacott, 1995).

L'émergence de la capacité à anticiper les perturbations posturales est explorée dans des situations motrices variées, impliquant l'ensemble du corps ou localisées sur un segment, auxquelles sont associés, ou non, des objets.

Anticipation posturale et mouvements impliquant l'ensemble du corps

Les grandes étapes du développement psychomoteur, mais aussi les plus subtiles, reposent sur le développement de la coordination entre posture et mouvement (Bertenthal et Von Hofsten, 1998 ; Rochat, 1992). L'acquisition de chaque nouvelle compétence repose ainsi sur la construction d'une connexion spécifique qui relie le mouvement et l'APA.

Par exemple, le déplacement du bras vers l'avant lors de l'atteinte manuelle nécessite la stabilisation du tronc, dans la mesure où le geste induit une modification de la géométrie corporelle et de la répartition des forces dans le corps. Dans une situation où des enfants, maintenus par la taille en station assise, produisent un mouvement d'atteinte avec le bras, Von Hofsten et ses collaborateurs ont relevé des APA au niveau du tronc dès 9 mois (Von Hofsten et Woollacott, 1989 ; Von Hofsten, 1993). Ces résultats n'ont toutefois pas été retrouvés par Van der Fits et Hadders-Algra (1998) pour qui les activations anticipées ne sont clairement identifiables qu'à partir de 18 mois. En procédant au suivi longitudinal d'enfants de 6 à 18 mois, Van der Fits et collaborateurs (1999) repèrent néanmoins l'émergence d'APA réguliers et reproductibles au niveau du cou autour de 15 mois, lorsque le bras est tendu vers l'avant.

L'acquisition de la station érigée est aussi favorisée par les capacités de contrôle postural anticipé. Barela, Jeka et Clark (1999) ont montré, chez des enfants de 42 à 61 semaines, que la stabilisation de la station debout repose progressivement sur l'anticipation des réafférences sensorielles provenant de leur main appuyée sur un support (un cube). Avant que les enfants ne tiennent debout seuls, le cube est utilisé comme support mécanique de la position debout. Il devient ensuite progressivement une source d'information permettant de contrôler les oscillations du corps de façon proactive (13 mois). C'est aussi autour de cet âge que Witherington et ses collègues (2002) relèvent des activations posturales anticipées permettant de limiter la déstabilisation de la posture chez des enfants debout qui tirent un tiroir.

L'accès à la marche autonome bénéficie également du développement du contrôle proactif de la posture. Lors de l'initiation d'un pas, un APA consistant au déplacement latéral du poids du corps vers la jambe pivot et en une inclinaison latérale du pelvis, permet de décharger la jambe mobile. Cet ajustement est présent dès les premiers pas, entre 18 et 30 mois (Assaiante, Woollacott, et Amblard, 2000). Brenière et collaborateurs ont montré

que le transfert anticipé du centre de pression nécessaire à l'initiation de la marche est présent à 2,5 ans mais qu'il est systématiquement utilisé seulement autour de 6 ans (Brenière, Bril, et Fontaine, 1989 ; Ledebt, Bril, et Brenière, 1998).

Enfin, le développement du contrôle postural anticipé permet l'élargissement du répertoire des habiletés motrices globales. Lors de l'élévation rapide d'un bras, les APA qui permettent au sujet debout de garder son centre de pression à l'intérieur du polygone de sustentation, sont présents chez des enfants de 4 ans dans presque tous les essais (Riach et Hayes, 1990 ; Hay et Redon, 2001). Ces APA deviennent progressivement systématiques et mieux coordonnés avec la perturbation posturale mais à 8 ans, ils ne sont toujours pas superposables à ceux mesurés chez l'adulte (Hay et Redon, 2001). De même, le passage sur la pointe des pieds semble impossible aux enfants de moins de 4 ans, âge auquel il est précédé d'un transfert anticipé du centre de pression vers l'avant (Haas, Diener, Rapp, et Dichgans, 1989). Enfin, lors d'un saut en contrebas, l'activité anticipée des muscles des jambes avant la réception dépend de la hauteur du saut et de la surface du lieu d'atterrissage. Compte tenu des multiples variables à contrôler, le développement du contrôle postural du saut en contrebas n'est pas encore achevé à 10 ans (McKinley et Pedotti, 1992 ; McKinley et Pelland, 1994).

En résumé, les jeunes enfants présentent très tôt après l'acquisition de nouvelles habiletés motrices, les APA qui y sont associés. Toutefois, les processus d'anticipation posturale ne sont pas encore optimaux, ce qui constitue une des causes principales de l'instabilité du jeune enfant (Haas et Diener, 1988). La maîtrise de la fonction d'anticipation s'accroît ensuite progressivement au cours de l'enfance pour atteindre le niveau de l'adulte.

Anticipation posturale lors du lâcher ou de la réception d'un objet

Lorsqu'un sujet lâche ou réceptionne un objet, le retrait ou l'ajout de poids déclenche une modification de la répartition des forces dans le corps, qui peut être à l'origine d'une perte d'équilibre. Dans ces cas, le sujet doit avoir recours à une représentation des propriétés pondérales de l'objet afin de produire un contrôle postural anticipé adapté qui préserve la stabilité du corps au cours de l'action. Le paramétrage de l'APA repose alors sur une coordination entre représentation des propriétés biomécaniques du corps et représentation de l'objet.

Lors du lâcher d'un objet, les réafférences sensorielles tactiles et proprioceptives produites lors de son maintien permettent un ajustement « en direct » au poids de l'objet (Johansson, 1996). En revanche, lors de la réception, les informations relatives au poids de l'objet sont contenues dans une représentation construite au cours de sa manipulation et stockée en mémoire (Mounoud, 1973 ; Hauert, 1980 ; Jeannerod, 1994 *a* ; 1994 *b* ; Johansson, 1996). Le réglage des APA qui permettent le maintien de la stabilité posturale lors de la réception de l'objet repose alors sur l'accès à ces représentations mémorisées. D'après Forsberg, Jucaite et Hadders-Algra (1999), les représentations des propriétés des objets pourraient être communes à l'organisation du mouvement volontaire et à l'organisation de l'APA.

Le lâcher d'un objet est précédé, chez l'adulte, d'un APA dont les caractéristiques dépendent de la perturbation posturale attendue, autrement dit du poids dont le sujet se déleste (Aruin et Latash, 1996). Pour étudier le développement de ces APA, Hay et Redon (1999) ont développé une tâche de lâcher d'objet chez des enfants de 3 à 8 ans. Les enfants sont debout sur une plate-forme de force et maintiennent entre leurs mains un cylindre (5 % de leur poids) qu'ils laissent tomber à un signal, ou dont l'expérimentateur les déleste de façon inattendue. Dès 3 ans, le retrait du poids est suivi d'un déplacement du centre de pression vers l'arrière qui est moins important lorsque les enfants lâchent volontairement l'objet, comparé au délestage imposé par l'expérimentateur. Entre 3 et 5 ans, la variabilité intra-individuelle est toutefois importante. À 8 ans, la perturbation posturale qui suit le lâcher volontaire et la variabilité des APA restent encore plus grandes que chez les adultes. L'anticipation posturale permettant de compenser la modification de répartition du poids dans le corps lors du lâcher est donc visible précocement mais requiert un long développement avant d'atteindre son maximum d'efficacité.

La réception sur la main d'un objet en chute libre est également précédée d'un APA. Chez l'adulte, les caractéristiques des activités musculaires anticipées dépendent de l'énergie cinétique de l'objet au moment de son contact avec la main, et donc de son poids [1], lorsque le sujet peut voir la chute (Lacquaniti *et al.*, 1987 ; 1989 a ; 1989 b ; Shiratori *et al.*, 2001 ; Aruin, Shiratori, et Latash, 2001). Nous n'avons pas connaissance d'étude explorant les APA dans une tâche de réception chez l'enfant. En revanche, une de nos recherches menée avec des enfants de 21 à 40 mois utilise un protocole qui s'en approche. Les enfants sont debout et ont le bras droit fléchi vers l'avant ; un plateau est posé sur leur main en supination, sur lequel l'expérimentateur dépose un objet (Jover et Mellier, soumis). Cette situation peut être comparée à la situation de réception, où l'énergie cinétique serait égale au poids de l'objet. Dans notre tâche, le lestage est effectué sous les yeux de l'enfant, avec une boîte dont le poids est inconnu (boîte jamais manipulée), connu (boîte préalablement manipulée) ou inattendu (utilisation d'une boîte identique mais deux fois plus légère). Les enfants se tiennent sur une plate-forme de force et le bras soutenant le plateau est filmé de profil. La stabilité de la posture est attestée par les déplacements du centre de pression et les variations de l'angle du coude à partir du moment où la boîte est posée sur le plateau. Les résultats ont montré que jusqu'à 2 ans, l'ajout de poids sur le plateau induit une extension du coude importante, et dont l'amplitude est la même, que l'enfant ait préalablement manipulé la boîte ou non. À cet âge, le contrôle de la stabilité du coude serait donc rétroactif et ne dépendrait pas de la connaissance du poids de l'objet. Au cours de la troisième année, la déstabilisation induite par la dépose de la boîte sur le plateau diminue lorsque les enfants connaissent son poids. Enfin, le lestage d'une boîte leurre plus légère que celle attendue induit, chez tous les enfants testés (31 mois - 40 mois) une détérioration de la stabilité de la posture qui se traduit par une forte déviation du centre de pression. Nos résultats nous ont permis de conclure que l'anticipation posturale de la réception d'un objet sur un plateau est visible durant la troisième année.

Les APA associés au lâcher et la réception d'objet impliquent probablement des mécanismes différents. En effet, chez l'adulte, plusieurs études montrent que les APA sont différés et moins reproductibles lors de la réception d'un objet en chute libre qui n'est pas lâché par le sujet lui-même mais par un expérimentateur (Shiratori *et al.*, 2001 ; Nowak et Hermsdorfer, 2004). Nous pensons, avec ces auteurs, que le recours à une représentation de l'objet mémorisée rend plus difficile l'organisation des APA comparativement aux situations de perturbation posturale volontaire, comme lors du lâcher, au cours desquelles l'accès à la représentation de l'objet est *direct* grâce aux réafférences sensorielles (Jover et Mellier, sous presse).

Anticipation posturale au niveau segmentaire : le paradigme du garçon de café

Le paradigme du garçon de café s'inspire de l'observation selon laquelle un garçon de café déleste et leste de verres et de bouteilles le plateau posé sur son avant-bras, sans que celui-ci soit déséquilibré. Il maîtrise ainsi parfaitement la coordination entre son geste, le transfert de poids d'un bras à l'autre, et le maintien du plateau à l'horizontale. Ce transfert constitue une situation de référence pour explorer les APA dans le bras qui soutient le plateau (bras postural) lors de la modification de la localisation du poids (Hugon, Massion, et Wiesendanger, 1982).

Selon une approche fonctionnelle, le développement de l'anticipation posturale repose sur la maîtrise progressive des fonctions de coordination, d'anticipation et d'adaptation (Assaiante, 2000). La *fonction de coordination* permet, lors de l'exécution d'un geste, de coordonner les différents segments corporels avec le maintien de la stabilisation posturale. La *fonction d'anticipation* permet de prévoir les conséquences posturales d'une action sur l'environnement, ou sur soi-même. Enfin, la *fonction d'adaptation* révèle la capacité de l'enfant à changer de stratégie et à intégrer au contrôle de la posture les modifications des contraintes internes (croissance) ou externes (tâche à réaliser). Le paradigme du garçon de café faisant appel à ces trois fonctions, nous l'avons adapté aux enfants afin d'analyser le développement des APA au niveau segmentaire et en interaction avec les propriétés des objets.

Nous nous sommes intéressés au développement du contrôle postural associé au lestage bimanuel chez des enfants de 21 à 40 mois (Jover, 2002). Dans cette situation expérimentale, les enfants sont debout et maintiennent un plateau à l'horizontale sur leur main droite en supination, coude fléchi (*fig. 1 A*). Nous avons comparé une situation où les enfants leste eux-mêmes, avec la main controlatérale, le plateau avec une boîte de 100 g, avec une situation contrôle où c'est l'expérimentateur qui dépose une boîte, jamais manipulée, sur le plateau, sous les yeux de l'enfant. Les enfants se tiennent sur une plate-forme de force et leur bras postural est filmé de profil. La stabilité posturale est attestée à la fois par l'étude des variations du centre de pression, mais également par l'analyse vidéo de l'angle du coude au cours du lestage. Si les déplacements du centre de pression, extrêmement variables, ne permettent pas de distinguer les deux situations de lestage, l'analyse des variations angulaires du coude indique que dès 21 mois, le plateau est significativement mieux maintenu dans sa position initiale lorsque les enfants effectuent eux-mêmes le

lestage. Nous avons ainsi conclu que les enfants étaient capables, lorsqu'ils lestaient eux-mêmes le plateau, d'avoir recours à un APA efficace pour maintenir stable leur avant-bras, en dépit de l'ajout de poids.

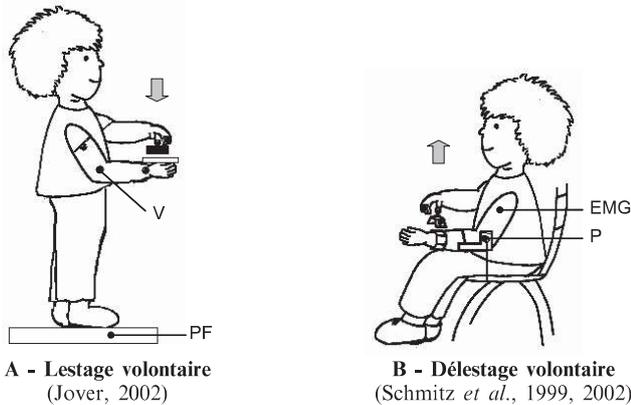


Figure 1. Représentation schématique de deux protocoles de coordination bimanuelle utilisés par l'équipe

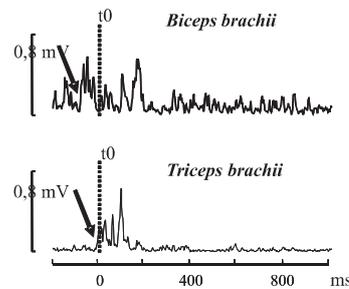
A / Dans le protocole de lestage bimanuel, les enfants sont debout sur une plate-forme de force (PF) et ont un plateau posé sur leur main droite. Au signal, les enfants déposent l'objet sur le plateau en tentant de maintenir stable la position de leur avant-bras droit. L'analyse posturale porte sur les déplacements du centre de pression (PF) et les déviations de l'angle du coude mesurées sur la vidéo (V).

B / Dans le protocole de délestage bimanuel, les enfants sont assis dans un fauteuil et ont le coude gauche placé dans une gouttière. Un bracelet fixé à leur poignet gauche supporte un poids que les enfants ont pour consigne de retirer après un signal tout en maintenant stable la position de leur avant-bras. L'analyse posturale porte sur les activités musculaires du bras postural (EMG) et les déviations de l'angle du coude mesurées par un potentiomètre (P).

Parallèlement, nous avons étudié le développement des APA associés au délestage bimanuel chez des enfants de 4 à 8 ans (Schmitz, Martin, et Assaiante, 1999 ; Schmitz, Martin, et Assaiante, 2002) (fig. 1 B). Dans cette tâche, les enfants sont assis et ont pour consigne de délester de la main droite un dispositif fixé sur le poignet controlatéral, d'un poids de 300 à 400 g selon leur âge. Dans une condition contrôle, le délestage est déclenché par l'expérimentateur de façon inattendue au moyen d'un circuit électromagnétique. Les résultats portent sur les activités EMG et sur les variations de l'angle du coude du bras postural avant, durant et après le délestage. Dans le cas du délestage imposé, le réflexe de délestage induit une flexion brusque du bras postural immédiatement après le retrait du poids. Ce mouvement repose sur les propriétés élastiques des muscles qui réagissent aux informations proprioceptives issues des fuseaux neuromusculaires comme un ressort déchargé brusquement ; la flexion du coude est suivie d'une inhibition des muscles fléchisseurs du coude (Hugon *et al.*, 1982). Lorsque le délestage est volontaire, les résultats montrent que dès 4 ans, la stabilisation de l'avant-bras est plus efficace ; la flexion du coude qui suit le délestage est diminuée. L'examen des stratégies musculaires anticipées mises en jeu indique, chez les jeunes enfants, une coexistence de patrons musculaires immature et mature. Le premier patron, appelé cocontraction, consiste en l'activation simultanée de mus-

cles antagonistes extenseurs et fléchisseurs du coude (fig. 2 A). Le second patron est caractéristique de l'adulte et consiste en une inhibition des muscles fléchisseurs du coude (fig. 2 B). Les jeunes enfants utilisent majoritairement les cocontractions pour stabiliser l'avant-bras postural mais ils utilisent néanmoins parfois également le patron d'inhibition du muscle fléchisseur. Le développement des APA procéderait par une sélection progressive du patron mature, que l'enfant aurait très tôt à sa disposition dans son répertoire. Au cours du développement, la variabilité intra-individuelle des APA tend à s'atténuer, le réglage temporel de l'inhibition des muscles fléchisseurs est progressivement maîtrisé et les perturbations posturales consécutives au délestage diminuent. L'enfant apprend à maîtriser le réglage fin des APA jusqu'à des âges assez avancés au cours du développement (Schmitz *et al.*, 1999 ; Schmitz *et al.*, 2002).

-A- Co-contraction fléchisseur/ extenseur



-B- Inhibition sur le fléchisseur

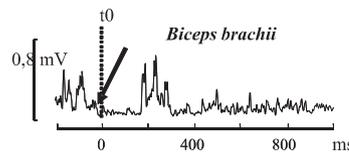


Figure 2. Patrons d'activité musculaire (EMG) obtenus lors de la situation de délestage volontaire

(A et B) pour le biceps brachii et le triceps brachii. t_0 indique l'instant du délestage. Les flèches indiquent le début de chaque événement musculaire. (A) Exemple d'un patron de cocontraction, caractérisé par une augmentation de l'activité dans les deux muscles antagonistes. (B) Exemple d'un patron d'inhibition du fléchisseur caractérisée par une diminution de l'activité dans le muscle fléchisseur.

En définitive, il semble que dans les tâches de lestage et de délestage bimanuel, les enfants intègrent très tôt les informations portant sur le poids d'un objet tenu par une main pour régler la force permettant de maintenir la stabilité du bras postural. Le fait qu'un objet soit introduit au cœur du geste ne semble donc pas différer le développement de l'anticipation posturale.

Conclusion

Les études développementales indiquent 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 au niveau des perfor-

mances et au niveau des activations musculaires qui les sous-tendent. En outre, les activités EMG manquent de spécificité : les patrons d'activation consistent majoritairement en des cocontractions d'amplitude parfois très importante. Enfin, de façon typique, les APA sont mal synchronisés avec le mouvement volontaire : la concordance temporelle avec le début de la perturbation est approximative et variable.

La lenteur du développement de l'anticipation 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 du corps, à la fois dans ses propriétés géométriques et cinétiques, mais aussi lors des interactions avec l'environnement et les objets.

Les mécanismes présidant au développement de l'anticipation posturale intègrent donc à la fois des facteurs maturationnel et épigénétique. L'anticipation posturale dans la marche ou autres habiletés motrices semble dépendre autant de la pratique et de l'expérience que de la maturation neuronale. 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 sensorielles, les représentations internes et enfin les mécanismes d'anticipation et d'adaptation. Ainsi, par exemple, le nombre d'essais nécessaire à l'apprentissage des APA associés à une nouvelle coordination bimanuelle diminue avec l'âge, ce qui exclut l'expérience comme seul facteur de développement (Schmitz et Assaiante, 2002).

MODÈLES PATHOLOGIQUES ET DÉVELOPPEMENT DE L'APA

Afin d'approfondir les mécanismes impliqués dans la mise en place des fonctions de coordination, d'anticipation et d'adaptation chez l'enfant, nous avons exploré successivement l'effet d'un déficit moteur d'origine central et d'un déficit moteur d'origine périphérique sur l'organisation et le développement des APA dans le protocole du garçon de café. L'autisme a été choisi comme un modèle d'atteinte du développement du système nerveux central ayant des répercussions sur l'organisation des actions. La myopathie de Duchenne est envisagée comme une pathologie motrice périphérique, dans laquelle la faiblesse musculaire crée une contrainte importante dans l'organisation du mouvement. La tâche bimanuelle de délestage décrite au chapitre précédent (*fig. 1 B*), nous a permis de caractériser les possibilités d'anticipation posturale dans chacune de ces pathologies. Dans cette tâche, les enfants sont assis et ont pour tâche de délester de la main droite un dispositif fixé sur le poignet controlatéral. Dans une condition contrôle, le délestage est déclenché par l'expérimentateur de façon inattendue. Les résultats portent sur les activités EMG et les variations de l'angle du coude du bras postural avant, durant et après le délestage.

L'autisme : modèle de déficit central du contrôle moteur

L'autisme est un trouble envahissant du développement qui débute précocement et dont Kanner (1943) retient comme éléments principaux un isolement et une incapacité à établir des liens affectifs avec autrui, une résistance aux changements, un développement anormal du langage et de la communication, ainsi que des bizarreries de comportement et des stéréotypies des gestes. Depuis cette description *princeps*, les critères diagnostiques de l'autisme ont été affinés (American Psychiatric Association, 2000 ; Organisation mondiale de la santé, 1998) et de très nombreuses recherches se sont développées tant du point de vue des dysfonctionnements (voir pour revue Adrien, 2004) que du point de vue de l'étiologie (voir pour revue Rodier, 2000). Dans le syndrome autistique, le système musculo-squelettique et le système nerveux périphérique semblent intacts mais certains comportements moteurs sont cependant déviants (Kanner, 1943). Les grandes fonctions motrices paraissent ainsi atteintes : fonctions de coordination, d'anticipation, d'adaptation, d'intentionnalité et d'imitation (Lelord et Sauvage, 1991). Un nombre croissant d'études expérimentales montre que les acquisitions motrices apparaissent parfois avec un léger retard, et présentent des atteintes dans les aspects plus fins du contrôle postural.

L'étude détaillée de Teitelbaum, Teitelbaum, Nye, Fryman, et Maurer (1998) sur des films de bébés diagnostiqués ensuite comme autistes, relève plusieurs dysfonctionnements du développement postural et moteur. Par exemple, lors du retournement en station allongée, l'analyse des coordinations intersegmentaires révèle que ces bébés n'utilisent pas la rotation séquentielle de chaque segment, comme le font les bébés sains, mais s'arquent sur le côté en élevant la tête et le bassin, puis provoquent leur retournement passivement en utilisant leur poids. De même, la station assise est acquise à l'âge habituel mais les jeunes enfants évalués présentent des chutes fréquentes dès qu'un mouvement de la tête ou du bras vient perturber la posture. Les réactions posturales ou les APA appropriés pour se protéger de la chute semblent également déficitaires. Enfin, la locomotion paraît, à 2 ans, encore très immature et le comportement locomoteur des enfants plus âgés peut également présenter un caractère déviant : asymétrie anormale entre les mouvements des bras et des jambes.

L'évaluation des coordinations psychomotrices à l'aide de tests standardisés tels que le Bruininks-Oseretsky Test ou le Movement Assesment Battery for Children, révèle également des déficits importants chez les enfants autistes. Ces déficits concernent les fonctions motrices globales et fines, l'équilibre, les coordinations (Szatmari, Tuff, Finlayson, et Bartolucci, 1990 ; Ghaziuddin et Butler, 1998 ; Noterdaeme, Mildenerger, Minow, et Amorosa, 2002 ; Piek et Dyck, 2004). Ces observations ont conduit Piek et Dyck (2004) à avancer que les « déficits de coordination motrice sont fondamentaux dans le syndrome autistique » (p. 482).

Enfin, certains des déficits moteurs mis en avant reposent sur des troubles de l'intentionnalité et de la planification des actions. Bullinger (1989) suggère ainsi que chez l'enfant autiste, la locomotion n'a pas pour fonction prin-

cipale l'exploration de l'espace, mais serait utilisée pour susciter un ensemble de sensations qui peuvent se substituer à l'atteinte spatiale du but. En analysant les activités spontanées d'enfants autistes sur des films pris avant qu'un diagnostic de certitude n'ait été posé, Lösche (1990) a aussi montré qu'à partir de 30 mois, le but des actions est identifiable dans deux tiers des cas chez les enfants sains et seulement un tiers des cas chez les enfants autistes.

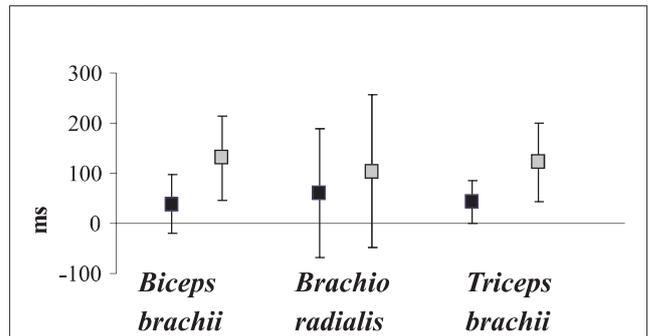
Ces études convergent pour décrire des troubles des coordinations motrices et de l'organisation des actions associées à l'autisme. Ce constat nous a conduit à envisager cette pathologie comme un modèle d'altération centrale du système moteur. Nous avons analysé l'atteinte fonctionnelle de la motricité dans cette pathologie, à travers l'anticipation et la coordination impliquées dans le paradigme du garçon de café.

Les APA associés au délestage bimanuel ont été étudiés dans un groupe de huit enfants autistes âgés de 6 à 10 ans, comparé à un groupe d'enfants contrôles (Schmitz, Martineau, Barthelemy, et Assaiante, 2003 ; Martineau, Schmitz, Assaiante, Blanc, et Barthelemy, 2004). Nous avons eu recours au protocole de délestage bimanuel (fig. 1 B) auquel nous avons associé une analyse des rythmes EEG. Les auteurs ont comparé les activités EEG, EMG et les performances de stabilisation de l'avant-bras des deux groupes d'enfants lors du délestage bimanuel. Les résultats indiquent que les performances de stabilisation du bras postural sont en général comparables entre enfants autistes et enfants contrôles. Néanmoins, l'analyse de chronométrie du délestage montre que pour arriver à stabiliser l'avant-bras au cours du délestage, les enfants autistes ralentissent considérablement le mouvement de soulèvement du poids. En ralentissant le délestage, ces enfants mettent à profit les informations proprioceptives qu'ils ont le temps d'intégrer en cours de mouvement. Les auteurs concluent que les enfants autistes utilisent préférentiellement un mode de contrôle rétroactif au détriment du mode de contrôle anticipé ou proactif de la posture. Les enregistrements EMG ont confirmé cette hypothèse. Comme les enfants contrôles, les enfants autistes présentent un large répertoire d'activités musculaires mais celles-ci sont retardées (fig. 3). Il semblerait que les enfants avec autisme mettent à profit l'allongement de temps qu'ils utilisent pour soulever le poids afin d'exercer des contractions multiples et ainsi ajuster en permanence la position de l'avant-bras postural. De plus, de façon concomitante avec les données cinématiques et EMG, l'analyse des rythmes EEG permet de révéler une activation corticale liée à l'anticipation posturale. Le rythme thêta mesuré dans l'aire C4 montre une DLE (désynchronisation liée à l'événement) avant le délestage volontaire chez les enfants contrôles uniquement, mais qui n'est pas retrouvée chez les enfants avec autisme (Martineau *et al.*, 2004).

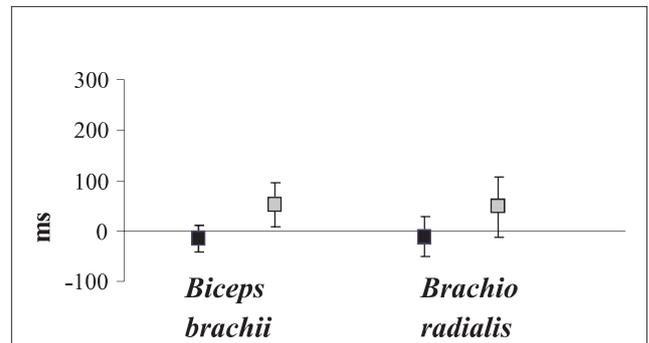
Ces résultats mettent en lumière une atteinte de l'utilisation de la fonction d'anticipation chez les enfants autistes (Schmitz *et al.*, 2003) et soulignent l'origine centrale du déficit de la fonction d'anticipation (Martineau *et al.*, 2004).

Le trouble de l'organisation des APA observé chez l'enfant autiste peut reposer à la fois sur un trouble de la construction des représentations ou bien sur un trouble de l'utilisation des représentations. En effet, il faut distinguer

Activations



Inhibitions



□ Enfants autistes ■ Enfants contrôlés

Figure 3. Latence d'apparition des activations et des inhibitions musculaires mesurées au niveau du biceps brachii, du brachio radialis et du triceps brachii lors du délestage volontaire chez les enfants sains et autistes. Les latences d'activations des extenseurs, et d'inhibitions du fléchisseur sont différées chez les enfants autistes (d'après Schmitz, 2001).

le fait de s'approprier les informations nécessaires à l'élaboration des représentations de l'action et le fait de se servir de ces représentations pour organiser le mouvement de façon proactive. L'altération de la perception de son corps et de la représentation de soi en tant qu'agent, souvent décrite chez ces enfants, pourrait constituer un frein à la construction/utilisation d'une représentation de l'action. L'autisme constitue ainsi un de nos modèles pour étudier l'effet d'un déficit des représentations de l'action sur le contrôle anticipé des actions (Schmitz, 2000 ; 2001).

La dystrophie musculaire de Duchenne (DMD) : un déficit périphérique

Décrite par Guillaume Duchenne de Boulogne (1868), la dystrophie musculaire de Duchenne (DMD) est caractérisée par une faiblesse musculaire sévère et évolutive, et parfois des déficits cognitifs (Billard *et al.*, 1992 ; Hodgson *et al.*, 1992 ; Tracey *et al.*, 1995).

Cette pathologie génétique, dont l'incidence est estimée à 1 naissance masculine sur 3 500, est due à une délétion ou une mutation dans le chromosome X (Xp21) qui conduit à une absence de dystrophine. Cette protéine est présente dans une variété de tissus, mais plus particulièrement dans la musculature squelettique, au maintien de laquelle elle est essentielle (Emery, 2002). Du fait de sa nature insidieuse, la DMD est généralement détectée à cause d'un retard d'acquisition de la marche, ou une faiblesse motrice. La

progression de la faiblesse musculaire est inexorable et la dégénérescence affecte plus particulièrement les muscles proximaux ainsi que les muscles des membres inférieurs et dorsaux (Gardner-Medwin, 1980). Cette pathologie constitue un modèle d'altération du système moteur périphérique, et permet d'analyser les conséquences d'une anomalie du développement du système moteur périphérique sur le développement de la fonction d'anticipation et de la représentation de l'action (Bosdure, 2003 ; Jover, Bosdure, Schmitz, Chabrol, et Assaiante, soumis).

Nous avons évalué les capacités à utiliser des APA dans le cadre de notre protocole bimanuel de délestage (*fig. 1 B*) chez huit garçons atteints de DMD âgés de 4 à 11 ans répartis en trois groupes d'âge (4-6, 7-8 et 9-11 ans). L'objectif était d'évaluer les stratégies musculaires sous-jacentes au contrôle anticipé, qui devrait être préservé chez ces enfants. Nous avons ainsi analysé comment ces enfants dépassent la contrainte imposée par la faiblesse musculaire et exploitent au mieux leurs capacités bimanuelles encore intactes. Nos résultats montrent que lors du délestage imposé, les caractéristiques du réflexe de délestage (délai, durée) sont préservées, ce qui signale l'intégrité de la boucle réflexe chez les enfants avec DMD de moins de 11 ans. La comparaison des conditions de délestage volontaire et imposé montre que la stabilisation de l'avant-bras reste meilleure lorsque les enfants procèdent eux-mêmes au délestage, révélant ainsi que la fonction d'anticipation est préservée chez les enfants myopathes âgés de 4 à 11 ans. Cependant, les performances de stabilisation de l'avant-bras n'atteignent pas le niveau de performance de la population contrôle, et semblent même diminuer avec l'aggravation du déficit musculaire lié à l'âge : la flexion du coude qui suit le délestage apparaît plus ample que chez les enfants contrôles et cette différence tend à s'accroître avec l'âge des enfants. L'analyse développementale des résultats EMG indique, de façon intéressante, que les enfants myopathes abandonnent plus tôt que les enfants contrôles le patron musculaire de cocontraction pour sélectionner plus précocement le patron musculaire d'inhibition des muscles fléchisseurs, moins coûteux en termes énergétiques (*fig. 4*). Ainsi, la fréquence d'utilisation des patrons d'inhibition est significativement plus élevée chez les enfants avec DMD.

Chez les enfants myopathes, les processus adaptatifs permettent donc encore une relative efficacité du geste et le maintien de la fonction d'anticipation durant la première décennie. Ce résultat signale l'intégrité des représentations centrales de l'action chez ces enfants. À l'inverse des enfants autistes, qui privilégient le mode rétroactif pour réussir la performance, les enfants atteints de DMD semblent ainsi favoriser un mode de contrôle anticipé de la posture. De plus, la sélection du patron EMG le plus efficace et le moins coûteux en termes énergétiques, c'est-à-dire l'inhibition du fléchisseur, semble être privilégiée chez les enfants myopathes au vu de leur affaiblissement musculaire (Jover, Bosdure, Schmitz, Chabrol, et Assaiante, soumis).

Conclusion

Le développement du contrôle proactif de la posture repose sur l'intégration de représentations portant à la fois sur le corps, mais également sur l'environnement, afin de prédire leurs interactions. Ainsi, ce n'est que dans un envi-

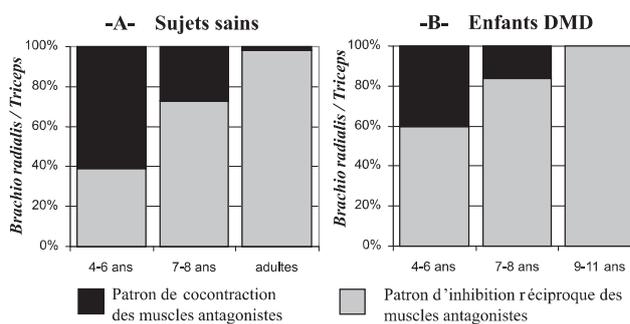


Figure 4. Évolution du pourcentage de cocontractions/inhibitions

Au cours du développement normal (A) et chez l'enfant atteint d'une DMD (B). Lors de la situation de délestage volontaire, pour chaque groupe d'âge (d'après Schmitz *et al.*, 2002 et Jover *et al.*, soumis).

ronnement prédictible que peut se construire une action finalisée et adaptée. Outre l'intérêt clinique qu'apporte une meilleure connaissance des déficits, les modèles de pathologie infantile permettent, par défaut, d'avoir accès à la connaissance des mécanismes, des structures et des réseaux indispensables au développement normal du contrôle postural anticipé.

Les deux modèles présentés ici concordent pour confirmer la place fondamentale des représentations dans l'organisation de l'APA. Chez l'enfant autiste, l'atteinte des représentations pénalise la construction des APA et les enfants privilégient l'utilisation d'un mode de contrôle rétroactif plutôt que prédictif. Inversement, chez les enfants myopathes, l'intégrité présumée du système nerveux central permet la construction des APA, dont la mise en œuvre est pénalisée par la faiblesse musculaire. Ces enfants potentialisent alors les moyens offerts par le contrôle prédictif de l'action. La faiblesse musculaire apparaît comme une contrainte imposée à un système en développement qui, dans ce cas, s'adapte en forçant le processus de sélection du patron musculaire le plus pertinent.

Nous pensons ainsi pouvoir distinguer l'altération des représentations motrices, mise en évidence dans le groupe des enfants autistes, de leur efficacité dans le geste, déficiente chez les enfants atteints de DMD. L'étude des APA dans la tâche de délestage bimanuel, étendue à d'autres pathologies où le déficit moteur est d'origine centrale (infirmité motrice cérébrale, trouble de l'acquisition des coordinations...), ainsi qu'une approche des APA intégrant les outils de l'imagerie cérébrale devraient permettre d'alimenter la problématique de la construction et de l'utilisation des représentations dans l'organisation anticipée de la posture.

RÉFÉRENCES

- ADRIEN (J. L.): *Psychopathologie de l'autisme infantile*, Paris, Dunod, 2004.
- AMERICAN PSYCHIATRIC ASSOCIATION : *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (4th edition ed.), American Psychiatric Association, Washington DC, 2000.

- ARUIN (A. S.) et LATASH (M. L.) : « Anticipatory postural adjustments during self-initiated perturbations of different magnitude triggered by a standard motor action », *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 101, 1996, pp. 497-503.
- ARUIN (A. S.), SHIRATORI (T.) et LATASH (M. L.) : « The role of action in postural preparation for loading and unloading in standing subjects », *Experimental Brain Research*, 138, 2001, pp. 458-466.
- ASSAIANTE (C.) : *Construction du répertoire des référentiels posturaux : maturation et adaptation au cours de l'enfance*, Habilitation à diriger des recherches en neurosciences, Université de la Méditerranée, 2000.
- ASSAIANTE (C.), WOOLLACOTT (M. H.) et AMBLARD (B.) : « Development of postural adjustment during gait initiation : Kinematic and EMG analysis », *Journal of Motor Behavior*, 32, 2000, pp. 211-226.
- BARELA (J. A.), JEKA (J. J.) et CLARK (J. E.) : « The use of somatosensory information during the acquisition of independent upright stance », *Infant Behavior and Development*, 22, 1999, pp. 87-102.
- BERNSTEIN (N. A.) : *The Coordination and Regulation of Movements*, Oxford, Pergamon Press, 1967.
- BERTENTHAL (B. I.) et VON HOFSTEN (C.) : « Eye, head and trunk control : The foundation for manual development », *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 22, 1998, pp. 515-520.
- BILLARD (C.), GILLET (P.), SIGNORET (J.), UICAUT (E.), BERTRAND (P.), FARDEAU (M.) et al. : « Cognitive functions in Duchenne muscular dystrophy : A reappraisal and comparison with spinal muscular atrophy », *Neuromuscular Disorders*, 2, 1992, pp. 371-378.
- BOSDURE (E.) : *Étude des fonctions d'anticipation et de coordination motrice chez l'enfant myopathe*, Mémoire de DEA, Université d'Aix-Marseille II, 2003.
- BOUISSET (S.) et ZATTARA (M.) : « A sequence of postural movements precedes voluntary movement », *Neuroscience Letters*, 22, 1981, pp. 263-270.
- BRENIÈRE (Y.), BRIL (B.), et FONTAINE (R.) : « 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, 1989, pp. 20-37.
- BULLINGER (A.) : « Locomotion, posture et manipulation manuelle chez l'enfant autiste », in G. Lelord, J. Muh, M. Petit, et D. Sauvage (éd.), *Autisme et trouble du développement global de l'enfant* (pp. 38-43), Paris, Expansion scientifique française, 1989.
- DIETZ (V.), TRIPPEL (M.), IBRAHIM (I. K.) et BERGER (W.) : « Human stance on a sinusoidally translating platform : Balance control by feedforward and feedback mechanism », *Experimental Brain Research*, 93, 1993, pp. 352-362.
- DUCHENNE DE BOULOGNE (G.) : *De la paralysie musculaire pseudo-hypertrophique ou paralysie myo-sclérotique*, Paris, P. Asselin, 1868.
- EMERY (A.) : « Muscular dystrophy into the new millennium », *Neuromuscular Disorders*, 12, 2002, pp. 343-349.
- FORGET (R.) et LAMARRE (Y.) : « Anticipatory postural adjustment in the absence of normal peripheral feedback », *Brain Res.*, 508, 1990, pp. 176-179.
- FORGET (R.) et LAMARRE (Y.) : « Postural adjustments associated with different unloadings of the forearm : Effects of proprioceptive and cutaneous afferent deprivation », *Can. J. Physiol Pharmacol.*, 73, 1995, pp. 285-294.
- FORSSBERG (H.) et NASHNER (L. M.) : « Ontogenetic development of postural control in man : adaptation to altered support and visual conditions during stance », *Journal of Neuroscience*, 2, 1982, pp. 545-552.
- FORSSBERG (H.) et HIRSCHFELD (H.) : « Postural adjustments in sitting humans following external perturbation : Muscle activity and kinematics », *Experimental Brain Research*, 97, 1994, pp. 515-527.
- FORSSBERG (H.), JUCAITE (A.) et HADDERS-ALGRA (M.) : « Shared memory representations for programming of lifting movements and associated whole body postural adjustments in humans », *Neuroscience Letters*, 273, 1999, pp. 9-12.
- GARDNER-MEDWIN (D.) : « Clinical features and classification of the muscular dystrophies », *Br. Med. Bull.*, 36, 1980, pp. 109-115.
- GHAZIUDDIN (M.) et BUTLER (E.) : « Clumsiness in autism and Asperger syndrome : A further report », *J. Intellect. Disabil. Res.*, 42 (Pt 1), 1998, pp. 43-48.
- HAAS (G.) et DIENER (H.) : « Development of stance control in children », in B. Amblard, A. Berthoz, et F. Clarac (Eds.), *Posture and Gait : Development, Adaptation and Modulation*, Amsterdam, Elsevier, 1988, pp. 49-58.
- HAAS (G.), DIENER (H. C.), RAPP (H.) et DICHGANS (J.) : « Development of feedback and feedforward control of upright stance », *Developmental Medicine and Child Neurology*, 31, 1989, pp. 481-488.
- HADDERS-ALGRA (M.), BROGREN (E.) et FORSSBERG (H.) : « Ontogeny of postural adjustments during sitting in infancy : Variation, selection and modulation », *Journal of Physiology (London)*, 493, 1996, pp. 273-288.
- HAUERT (C.-A.) : « Propriétés des objets et propriétés des actions chez l'enfant de 2 à 5 ans », *Archives de Psychologie*, 48, 1980, pp. 95-168.
- HAY (L.) et REDON (C.) : « Feedforward versus feedback control in children and adults subjected to a postural disturbance », *Experimental Brain Research*, 125, 1999, pp. 153-162.
- HAY (L.) et REDON (C.) : « Development of postural adaptation to arm raising », *Experimental Brain Research*, 139, 2001, pp. 224-232.
- HESS (W. R.) : « Teleokinetisches und ereismatisches Kräftesystem in der Biomotorik », *Helvetica Physiology and Pharmacology*, C62-C63, 1943.
- HIRSCHFELD (H.) et FORSSBERG (H.) : « Epigenetic development of postural responses for sitting during infancy », *Experimental Brain Research*, 97, 1994, pp. 528-540.
- HODGSON (S.), ABBS (S.), CLARK (S.), MANZUR (A.), HECKMATT (J.), DUBOWITZ (V.) et al. : « Correlation of clinical and deletion data in Duchenne and Becker muscular dystrophy, with special reference to mental ability », *Neuromuscular Disorders*, 2, 1992, pp. 269-276.
- HORAK (F. B.) et NASHNER (L. M.) : « Central programming of postural movements : Adaptation to altered support-surface configurations », *Journal of Neurophysiology*, 55, 1986, pp. 369-381.
- HUGON (M.), MASSION (J.) et WIESENDANGER (M.) : « Anticipatory postural changes induced by active unloading and comparison with passive unloading in man », *Pflügers Archiv*, 393, 1982, pp. 292-296.
- JEANNEROD (M.) : « Object oriented action », in K. Bennett et U. Castiello (Eds.), *Insights into the Reach to Grasp Movement*, Amsterdam, Elsevier Sciences Publishers B. V., 1994 a, pp. 3-15.
- JEANNEROD (M.) : « The representing brain : Neural correlates of motor intention and imagery », *Behavioral and Brain Science*, 17, 1994 b, pp. 187-245.
- JOHANSSON (R. S.) : « 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*, Academic Press, San Diego, 1996, pp. 381-414.
- JOVER (M.) : *L'Ajustement postural anticipé entre 2 et 4 ans : développement et anticipation du poids des objets*, thèse de psychologie, Université de Rouen, 2002.
- JOVER (M.) et MELLIER (D.) : « Influence des connaissances dans l'anticipation posturale chez l'enfant au cours du développement », *L'Année psychologique*, sous presse.
- JOVER (M.) et MELLIER (D.) : « Object's weight anticipation in postural adjustment in young children between 21 and 40 months », *Developmental Psychobiology*, soumis.
- JOVER (M.), BOSDURE (E.), SCHMITZ (C.), CHABROL (B.), et ASSAIANTE (C.) : « Anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children with Duchenne Muscular Dystrophy », *Developmental Medicine and Child Neurology*, soumis.
- KANNER (L.) : « Autistic disturbances of affective contact », *Nervous Child*, 2, 1943, pp. 217-250.
- LACQUANITI (F.) et MAIOLI (C.) : « Anticipatory and reflex coactivation of antagonist muscles in catching », *Brain Research*, 406, 1987, pp. 373-378.
- LACQUANITI (F.) et MAIOLI (C.) : « Adaptation to suppression of visual information during catching », *Journal of Neuroscience*, 9, 1989 a, pp. 149-159.
- LACQUANITI (F.) et MAIOLI (C.) : « The role of preparation in tuning anticipatory and reflex responses during catching », *Journal of Neuroscience*, 9, 1989 b, pp. 134-148.

- LACQUANITI (F.), MAIOLI (C.), BORGHESE (N. A.) et BIANCHI (L.): « Posture and movement : coordination and control », *Archives italiennes de biologie*, 135, 1997, pp. 353-67.
- LEDEBT (A.), BRIL (B.), et BRENIÈRE (Y.): « The build-up of anticipatory behaviour. An analysis of the development of gait initiation in children », *Experimental Brain Research*, 120, 1998, pp. 9-17.
- LELORD (G.) et SAUVAGE (D.): *L'autisme de l'enfant*, Paris, Masson, 1991.
- LOSCHÉ (G.): « Sensorimotor and action development in autistic children from infancy to early childhood », *J. Child Psychol. Psychiatry*, 31, 1990, pp. 749-761.
- MARTINEAU (J.), SCHMITZ (C.), ASSAIANTE (C.), BLANC (R.) et BARTHELEMY (C.): « Impairment of a cortical event-related desynchronization during a bimanual load-lifting task in children with autistic disorder », *Neuroscience Letters*, 2004, sous presse.
- MASSION (J.): « Movement, posture and equilibrium : Interaction and coordination », *Progress in Neurobiology*, 38, 1992, pp. 35-56.
- MASSION (J.): « Postural control system », *Current Opinion in Neurobiology*, 4, 1994, pp. 877-887.
- MASSION (J.): *Cerveau et motricité*, Paris, PUF, 1997.
- MASSION (J.): « Postural control systems in developmental perspective », *Neuroscience and Biobehavioral Review*, 22, 1998, pp. 465-472.
- MASSION (J.) et VIALLET (F.): « Posture, coordination et mouvement », *Revue neurologique*, 146, 1990, pp. 536-542.
- MASSION (J.), IOFFE (M. E.), SCHMITZ (C.), VIALLET (F.) et GANTCHEVA (R.): « Acquisition of anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task : Normal and pathological aspects », *Experimental Brain Research*, 128, 1999, pp. 229-235.
- MCKINLEY (P.) et PEDOTTI (A.): « Motor strategies in landing from a jump : The role of skill in task execution », *Exp. Brain Res.*, 90, 1992, pp. 427-440.
- MCKINLEY (P.) et PELLAND (L.): « Acquisition of anticipatory control during the execution of complex movements », in E. Fredizzi, G. Avanzini, et P. Crenna (Eds.), *Motor Development in Children*, London, John Libbey, 1994, pp. 71-78.
- MOUNOUD (P.): « Les conservations physiques chez les bébés », *Bulletin de psychologie*, 312, 1973, pp. 722-728.
- NOTERDAEME (M.), MILDENBERGER (K.), MINOW (F.), et AMOROSA (H.): Evaluation of neuromotor deficits in children with autism and children with a specific speech and language disorder, *Eur. Child Adolesc. Psychiatry*, 11, 2002, pp. 219-225.
- NOWAK (D. A.) et HERMSDORFER (J.): « Predictability influences finger force control when catching a free-falling object », *Exp. Brain Res.*, 154, 2004, pp. 411-416.
- ODDSSON (L. I.): « Control of voluntary trunk movements in man. Mechanisms for postural equilibrium during standing », *Acta Physiologica Scandinavica Supplementum*, 595, 1990, pp. 1-60.
- ORGANISATION MONDIALE DE LA SANTÉ: *Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes : CIM-10* (10^e éd.), Genève, Organisation mondiale de la santé, 1998.
- PAILLARD (J.): « Les déterminants moteurs de l'organisation spatiale », *Cahiers de psychologie*, 14, 1971, pp. 261-316.
- PAILLARD (J.): « Tonus, posture et mouvement », in C. Kayser (Éd.), *Traité de psychologie*, Paris, Flammarion, 1976, pp. 521-728.
- PAILLARD (J.): « Les niveaux sensori-moteur et cognitif du contrôle de l'action », in M. Laurent et P. Therme (éd.), *Recherches en APSI*, Marseille, Publications du centre de recherche de l'UEREPS, 1985, pp. 147-163.
- PIEK (J. P.) et DYCK (M. J.): « Sensory-motor deficits in children with developmental coordination disorder, attention deficit hyperactivity disorder and autistic disorder », *Hum. Mov. Sci.*, 23, 2004, pp. 475-488.
- RIACH (C. L.) et HAYES (K. C.): « Anticipatory postural control in children », *Journal of Motor Behavior*, 22, 1990, pp. 250-266.
- ROCHAT (P.): « 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, 1992, pp. 210-220.
- RODIER (P. M.): « The early origins of autism », *Sci. Am.*, 282, 2000, pp. 56-63.
- SCHMITZ (C.): « Une atteinte des fonctions d'anticipation et de coordination chez l'enfant autiste », *Évolutions psychomotrices*, 12, 2000, pp. 121-126.
- SCHMITZ (C.): *Développement de la fonction d'anticipation au cours d'une tâche bimanuelle de déstasse chez l'enfant sain et chez l'enfant autiste*, thèse de neurosciences, Université d'Aix-Marseille, 2001.
- SCHMITZ (C.), MARTIN (N.) et ASSAIANTE (C.): « Development of anticipatory postural adjustments in a bimanual load-lifting task in children », *Experimental Brain Research*, 126, 1999, pp. 200-204.
- SCHMITZ (C.) et ASSAIANTE (C.): « Developmental sequence in the acquisition of anticipation during a new co-ordination in a bimanual load-lifting task in children », *Neuroscience Letters*, 330, 2002, pp. 215-218.
- SCHMITZ (C.), MARTIN (N.) et ASSAIANTE (C.): « 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, 2002, pp. 354-364.
- SCHMITZ (C.), MARTINEAU (J.), BARTHELEMY (C.), et ASSAIANTE (C.): Motor control and children with autism : Deficit of anticipatory function ?, *Neuroscience Letters*, 348, 2003, pp. 17-20.
- SHIRATORI (T.) et LATASH (M. L.): « Anticipatory postural adjustments during load catching by standing subjects », *Clinical Neurophysiology*, 112, 2001, pp. 1250-1265.
- SHUMWAY-COOK (A.) et WOOLLACOTT (M. H.): *Motor Control. Theory and Practical Applications*, Williams and Wilkins, Baltimore (Maryland), 1995.
- SPORNS (O.) et EDELMAN (G. M.): « Solving Bernstein's problem : A proposal for the development of coordinated movement by selection », *Child Development*, 64, 1993, pp. 960-981.
- SZATMARI (P.), TUFF (L.), FINLAYSON (M. A.) et BARTOLUCCI (G.): « Asperger's syndrome and autism : Neurocognitive aspects », *J. Am. Acad. Child Adolesc. Psychiatry*, 29, 1990, pp. 130-136.
- TEITELBAUM (P.), TEITELBAUM (O.), NYE (J.), FRYMAN (J.), et MAURER (R. G.): « Movement analysis in infancy may be useful for early diagnosis of autism », *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 95, 1998, pp. 13982-13987.
- TRACEY (I.), SCOTT (R. B.), THOMPSON (C. H.), DUNN (J. F.), BARNES (P. R.), STYLES (P.) et al.: « Brain abnormalities in Duchenne muscular dystrophy : Phosphorus-31 magnetic resonance spectroscopy and neuropsychological study », *Lancet*, 345, 1998, pp. 1260-1264.
- VAN DER FITS (I. B.) et HADDERS-ALGRA (M.): « The development of postural response patterns during reaching in healthy infants », *Neuroscience et Biobehavioral Review*, 22, 1998, pp. 521-526.
- VAN DER FITS (I. B.), OTTEN (E.), KLIP (A. W.), VAN EYKERN (L. A.) et HADDERS-ALGRA (M.): « The development of postural adjustments during reaching in 6- to 18-month-old infants. Evidence for two transitions », *Experimental Brain Research*, 126, 1999, pp. 517-528.
- VIALLET (F.), MASSION (J.), MASSARINO (R.), et KHALIL (R.): « Coordination between posture and movement in a bimanual load lifting task : Putative role of a medial frontal region including the supplementary motor area », *Experimental Brain Research*, 88, 1992, pp. 674-684.
- VON HOFSTEN (C.): « Prospective control : A basic aspect of action development », *Human Development*, 36, 1993, pp. 253-270.
- VON HOFSTEN (C.) et WOOLLACOTT (M. H.): « Anticipatory postural adjustments during infants reaching », *Soc. Neuroscience Abstracts*, 15, 1989, pp. 1199.
- WITHERINGTON (D. C.), VON HOFSTEN (C.), ROSANDER (K.), ROBINETTE (A.), WOOLLACOTT (M. H.) et BERTENTHAL (B. I.): « The development of anticipatory postural adjustments in infancy », *Infancy*, 3, 2002, pp. 495-517.