

Une approche dynamique du trouble d'acquisition de la coordination

J.-M. ALBARET*, **, P.-G. ZANONE*, P. DE CASTELNAU*

* Laboratoire de Recherche en Activités Physiques et Sportives, EA 2044 « Acquisition et Transmission des Habiletés Motrices », UFR STAPS, Université Paul-Sabatier, 118, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex 4.

** Institut de Formation en Psychomotricité, Faculté de Médecine, 133, route de Narbonne, 31062 Toulouse Cedex.

RÉSUMÉ : *Une approche dynamique du trouble d'acquisition de la coordination.*

L'étude a pour but de caractériser la motricité des enfants affectés d'un trouble d'acquisition des coordinations (TAC) dans la perspective des théories dynamiques qui offrent un bon support théorique et méthodologique pour comprendre et analyser les phénomènes de coordination. L'expérimentation consiste en une observation et une mesure de la coordination bimanuelle (patron en phase et en anti-phase) de ces enfants. Les résultats montrent que les enfants TAC ont une motricité différente de celle des enfants issus d'un groupe contrôle et qu'ils restent significativement moins longtemps dans le patron en anti-phase. Les implications de ces résultats sur l'hétérogénéité du trouble, en faveur de trois types de dynamiques sous-jacentes, et la thérapeutique sont discutées.

Mots clés : Coordination motrice — Enfants dyspraxiques — Auto-organisation.

SUMMARY: *A dynamical approach to developmental coordination disorder.*

This study aims to characterize motor behavior of children with developmental coordination disorders (DCD) from a dynamical perspective. This framework yields theoretical and methodological tools to understand and analyze coordination. The experiment consist of an observation and an assessment of DCD children's bimanual coordination (i.e. in phase and antiphase patterns). Results suggest that their motor behavior are ruled by dynamics that are substantially different than that of a group of control subjects : both patterns are less stable. Implications regarding heterogeneity of the disorder, defining three types of dynamics, and therapeutics are discussed.

Key words: Motor coordination — Dyspraxic children — Self-organization.

Les troubles du mouvement intentionnel et de la coordination motrice (Albaret, 2000 ; Corraze, 1999) sont au cœur des troubles psychomoteurs. Simple retard ou trouble, ces difficultés ont été décrites chez l'enfant sous diverses appellations recouvrant des réalités cliniques pas toujours superposables. On a ainsi utilisé les termes de « débilite motrice » (Dupré, 1907, *in* Dupré, 1925), « maladresse anormale » (Orton, 1937), « maladresse congénitale » (Ford, 1960), « dyspraxie de développement » (Brain, 1961), « apraxie de développement » (Walton *et al.*, 1962), « maladresse de développement » (Reuben et Bakwin, 1968), « agnosie et apraxie du développement » (Gubbay, 1975), « dyspraxies-dysgnosies de développement » (Lesny, 1980), « enfants maladroits sur le plan physique » (Wall, 1982), « dysfonctionnement perceptivomoteur » (Laszlo *et al.*, 1988), « difficultés de mouvement » (Sugden et Keogh, 1990) et, dernièrement, « trouble d'acquisition de la coor-

dination » (DSM-IV, APA, 1994) ou « trouble spécifique du développement moteur » (CIM 10, OMS 1992).

La fréquence du trouble de l'acquisition de la coordination se situe entre 5 et 10 % (Corraze, 1999 ; Henderson et Hall, 1982 ; Kadesjö et Gillberg, 1999 ; Kaplan *et al.*, 1998 ; van Dellen et Geuze, 1988).

CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES

Les facteurs étiologiques mentionnés sont divers : trouble du développement cérébral, facteurs héréditaires, absence de stimulation et limitation des occasions d'apprentissage, motivation de l'enfant. Comme pour la majorité des troubles psychomoteurs, la pluralité étiologique doit être envisagée. La prématurité est un facteur de risque notamment pour les troubles visuoconstructifs (Dalla Piazza, 1997). Les facteurs

pré-, péri- ou néonataux sont présents chez un grand nombre d'enfants dyspraxiques (Gubbay, 1978 ; Johnston *et al.*, 1987). A l'aide du CT-scan, un taux élevé d'anomalies cérébrales non spécifiques, dilatation ventriculaire, atrophie corticale ou démyélinisation, a été signalé (Knuckey *et al.*, 1983) ainsi que des anomalies EEG. Des signes doux sont fréquemment retrouvés, ils peuvent être en faveur d'un dysfonctionnement du cervelet ou des ganglions de la base (Volman et Geuze, 1998).

Selon le DSM-IV, les enfants affectés d'un trouble d'acquisition de la coordination sont des enfants d'intelligence normale, sans troubles neurologiques ou affection somatique avérés mais qui rencontrent des difficultés dans la réalisation des activités de la vie quotidienne, nécessitant une coordination motrice. Cela se manifeste principalement par une grande maladresse ainsi que des retards importants dans les étapes du développement psychomoteur (marcher, ramper, s'asseoir), par le fait de laisser tomber des objets, par de mauvais résultats sportifs, ou bien encore une écriture de mauvaise qualité.

Pendant, dans cette entité très générale regroupant les enfants avec un trouble de l'acquisition de la coordination, on peut isoler les dyspraxies de développement. Le tableau de dyspraxie (Albaret, 1999 ; Albaret *et al.*, 1995 ; Gubbay *et al.*, 1965 ; Stamback *et al.*, 1964), associe, en plus des incoordinations et de la lenteur de réalisation, des troubles dans les praxies gestuelles (difficultés à imiter un geste), visuoconstructives (difficultés à orienter les différents éléments d'une figure les uns par rapport aux autres au niveau graphique ou lors d'une construction) et de l'habillage (incapacité de l'enfant à nouer ses lacets ou à se boutonner), ainsi que des troubles du tonus fréquents.

Les anomalies perceptivomotrices et psychomotrices sont multiples. Elles comprennent notamment :

- une faible discrimination proprioceptive et kinesthésique (Lazzlo *et al.*, 1988) ;
- une mauvaise perception de la durée relative des sons (Williams, Woollacott et Yvry, 1992) ;
- des perturbations dans les perceptions visuelles (Hulme *et al.*, 1982) et surtout des informations visuospatiales (Wilson et McKenzie, 1998) ;
- une influence peu marquée des rétroactions visuelles dans une tâche de poursuite manuelle (Van der Meulen *et al.*, 1991) ;
- une perturbation dans le transfert intermodal (Newnham et McKenzie, 1993) ;
- une instabilité posturale dans l'équilibre statique (Williams *et al.*, 1985) ;
- un temps de réaction et de mouvement allongé (Henderson *et al.*, 1992 ; Van Dellen et Geuze, 1988) ;
- une utilisation prépondérante de la mémoire visuelle par rapport à la mémoire motrice (Skorji et McKenzie, 1997) ;
- un déficit dans les processus attentionnels (Wilson et Maruff, 1999) ;
- une moindre régularité dans les épreuves de pointillage (Geuze et Kalverboer, 1993) ;
- un contrôle proximal plutôt que distal au niveau de l'écriture avec diminution de la souplesse du geste (Misiuna, 1994) ;
- une écriture de mauvaise qualité (Wann, 1986) ;
- des coordinations bimanuelles d'autant plus échouées que la coordination est complexe (Volman et Geuze, 1998) ;

- des coordinations générales (course, sauts...) atypiques et se caractérisant principalement par un manque d'amplitude, une limitation des degrés de liberté des articulations ainsi qu'un enchaînement séquentiel inapproprié des parties du corps concernées par le mouvement (Larkin et Hoare, 1992 ; Williams *et al.*, 1985).

LA THÉORIE DES SYSTÈMES DYNAMIQUES

Il ressort de ce qui précède que le trouble de la coordination constitue l'élément clef autour duquel s'articulent pratiquement tous les symptômes du tableau. En tant que « motricien » maintenant, c'est-à-dire en tant que théoricien de la production motrice, la question centrale est de comprendre comment se réalise ce phénomène, *a priori* si improbable, de coordination (voir Zanone, 1999, pour une discussion plus fouillée des arguments développés ici). En effet, si l'on se livre à un décompte des éléments du système neuromusculo-squelettique qui sont impliqués, à divers titres et degrés, dans la réalisation d'un mouvement coordonné (mobilisation des articulations, contraction des muscles, leur innervation, mais aussi vascularisation, etc.), il devient évident que la tâche de les coordonner en un mouvement adapté est d'une complexité folle. Dans les modèles théoriques traditionnels, d'inspiration bio-cybernétique (e.g., Paillard, 1982 ; Jeannerod, 1993), le mérite en revient au système nerveux central (SNC) qui traite de manière idoine les informations entrantes pour générer une commande motrice qui assure la coordination entre les multiples composantes du système. Ce traitement, de nature algorithmique et computationnelle, se fait à travers une succession hiérarchique d'instances ou de modules interconnectés, chacun étant dévolu spécifiquement à la spécification d'un aspect logique de l'action à réaliser (par exemple, la direction, la distance ou la force du mouvement) ou au contrôle de sa bonne exécution par l'entremise de boucles de régulation. Hormis les doutes que l'on peut soulever quant à l'implémentation en temps réel de tels modèles et leur plausibilité biologique, une limitation irrémédiable réside en ce qu'ils ne résolvent en rien le problème central de la réduction ou coordination des degrés de liberté. Comme le démontre le physiologiste russe Bernstein au début du siècle déjà (1967, pour une première version non russe), l'hypothèse que le SNC contrôle activement tous les degrés de liberté impliqués dans un acte moteur par la commande motrice n'est tout bonnement pas tenable pour de simples raisons de capacité de traitement limitée du SNC. Aussi le système nerveux doit-il recourir à ce que Bernstein nomme des « synergies », c'est-à-dire des unités fonctionnelles plus larges regroupant de nombreux degrés de liberté de manière flexible et spécifique à la tâche. Bien qu'encore de nature très neurophysiologique, la notion de synergie véhicule l'idée d'une structure qui assure à la fois l'invariance, la stabilité de la réponse motrice et sa flexibilité, son changement face aux diverses situations dans lesquelles cette réponse se produit. Plusieurs avatars de cette idée ont fait florès dès les années 50, sous les notions de programme moteur (Keele, 1968) ou de schémas moteurs (Schmidt, 1975), par exemple. Il s'agit d'un canevas ou d'une partition, pour reprendre une analogie courante, qui est stockée centralement et assure le dérou-

lement du mouvement, en ce qu'il code l'ordonnement temporel de la commande motrice. Si l'assomption de tels programmes réussit à régler en bonne partie le problème de la réduction des degrés de liberté, elle se heurte aux problèmes insolubles de leur stockage, à celui de leur apparition ou de leur combinaison en réponse à une situation nouvelle et à celui de leur sélection. Au vu des limites que présente cette approche classique en ce qui concerne la coordination motrice, on peut *a fortiori* douter des pistes qu'elle offre pour envisager le problème des troubles de la coordination. Durant la dernière décennie, l'étude de la coordination dans les systèmes biologiques (e.g., Kelso, 1995 ; Schönér et Kelso, 1988), et en particulier la coordination motrice, s'est mise au diapason d'autres disciplines qui empruntent leurs concepts et leurs méthodes aux théories physiques de l'auto-organisation (e.g., Haken, 1983 ; Prigogine et Stengers, 1979) et leur formalisme aux systèmes dynamiques. L'idée de base de l'auto-organisation est que dans tout système complexe loin de l'équilibre, c'est-à-dire un système composé d'innombrables degrés de liberté et traversé par des flux énergétiques (partant, informationnels), les composantes peuvent se coordonner de manière spontanée sous l'influence de contraintes externes. Les formes ou patrons de coordination qui en découlent résultent donc uniquement des interactions locales, non linéaires que ces composantes entretiennent. De tels phénomènes auto-organisationnels sont extrêmement variés : les mouvements convectifs de l'atmosphère terrestre, dont découlent, entre autres, le maintien des vents alizés ou la répartition des zones désertiques ou tropicales sur le globe, le trafic routier, les régimes de turbulences dans les fluides et une infinité d'autres exemples, des plus microscopiques au plus macroscopiques. Mais en dépit de cette variété immense, tous ces phénomènes répondent à des principes et à des mécanismes identiques. Or, par définition, les systèmes biologiques sont des systèmes complexes loin de l'équilibre. Aussi n'est-il pas surprenant qu'ils démontrent également, à toutes les échelles de temps et d'espace, des phénomènes d'émergence spontanée de forme collective, comme la formation de nids chez les insectes sociaux, l'ouverture et la fermeture des canaux transmembranaires, la spéciation au cours de l'évolution, les réactions immunitaires, la sélection neuronale, la coloration des pelages, etc. (voir, par exemple, le numéro spécial de *La Recherche*, janvier 1998).

Quant aux modèles des systèmes dynamiques, ils s'intègrent dans cette perspective en raison de la simplicité que ces patrons manifestent sur le plan collectif en regard de la complexité structurelle du système. Ainsi, l'état de tout le système (auto)organisé peut être caractérisé par un ensemble très limité de variables, idéalement une seule. Par exemple, l'état collectif d'une myriade de molécules en interaction peut être rendu par une variable unique, la température. Par conséquent, l'évolution de l'état du système au cours du temps peut être formalisé par un système dynamique, c'est-à-dire, en termes mathématiques, par l'équation de mouvement de la *variable collective* qui caractérise la forme prise par le système. Dans notre exemple, l'augmentation de l'agitation des molécules se traduit par celle de la température, si bien que cette dernière « résume » en quelque sorte les comportements individuels.

Depuis peu, les théories des systèmes dynamiques s'intéressent à la coordination motrice et postulent que cette

dernière est une propriété émergente, auto-organisée du système moteur, participant à la fois de l'interaction (non linéaire) entre les composantes et de l'effet de contraintes globales qui s'exercent sur lui, de nature non seulement physique (biomécanique, énergétique, etc.), mais aussi, et surtout, informationnelle (stimulation, tâche) et/ou psychologique (attention, volition, etc.) (e.g., Schönér et Kelso, 1988 ; Kelso, 1994). Ainsi, l'accent n'est plus mis sur la prescription assurée par le SNC, mais sur l'interaction des éléments en jeu et leur relation avec « l'extérieur ». De même, la propriété essentielle de la réponse motrice n'est plus l'invariance assurée par la commande motrice (e.g., Viviani et Terzuolo, 1983), mais bien la stabilité dans le temps dont fait preuve la forme collective issue de la coordination.

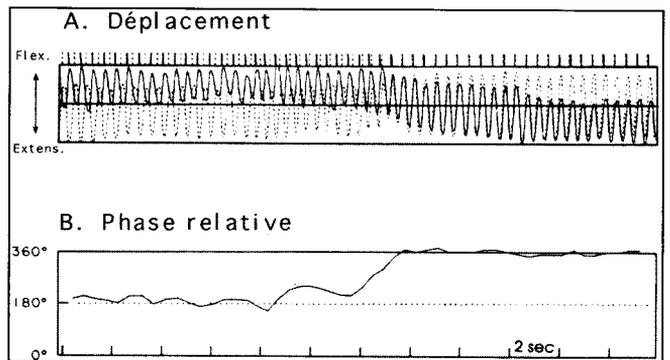


Figure 1. Mise en évidence de la dynamique de coordination bimanuelle (d'après Kelso, 1984).

La première évidence d'auto-organisation dans le domaine de la motricité a été rapportée par Kelso (1984). Le phénomène de base est très simple. Si on demande à des sujets de réaliser des mouvements périodiques avec deux doigts¹, à une fréquence commune, on remarque rapidement qu'il existe deux patrons de coordination préférentiels : celui en phase, qui correspond à l'activation des muscles homologues des deux doigts conduisant à des mouvements simultanés de flexion et d'extension et qui s'avère le plus facile à réaliser et le plus stable, et le patron en opposition de phase ou en anti-phase (un doigt en flexion et l'autre en extension), un peu plus difficile et un peu moins stable. Ainsi, si les mouvements se font dans un même plan, les membres se déplacent, dans le premier cas, dans la direction opposée, alors que, dans le second, ils le font dans la même direction. Notons que ce comportement est spontané et tout autre manière de réaliser la tâche est très inconfortable, voire impossible à maintenir. Contraignons maintenant le système, en demandant aux sujets d'effectuer un mouvement en anti-phase et d'en augmenter progressivement la vitesse. La *figure 1A* montre que c'est bien ce que réalisent les sujets au début, puisque, dans sa partie gauche, le doigt droit (ligne continue) est en flexion quand le doigt gauche (ligne discontinue) est en extension, et vice versa. Avec l'augmentation de la fréquence, rien ne se passe tout d'abord. Mais à partir d'une certaine fréquence (au milieu de la *figure 1A*),

1. On peut penser aux deux index, mais cela est vrai pour deux mains, deux avant-bras, etc.

quelque chose d'inattendu et soudain intervient : les sujets passent spontanément de mouvements en anti-phase à des mouvements en phase (sur la droite de la figure, les deux doigts se déplacent de conserve), alors que rien ne stipule ce changement de patron de coordination. Le système est donc doté d'une dynamique propre qui régit le comportement en fonction de la vitesse adoptée. Cette dynamique détermine deux états de coordination stables à basses fréquences, mais un seul à hautes fréquences. C'est ainsi que la disparition de la coordination en anti-phase, initialement moins stable, induite par l'augmentation de la vitesse d'oscillation prescrit le passage au patron en phase, initialement plus stable, qui reste alors seul présent. Ce phénomène spontané correspond à une altération qualitative de la dynamique sous-jacente par la disparition d'un patron de coordination. Il est à noter que c'est toujours le patron le moins stable intrinsèquement qui disparaît le premier, si bien que la manière dont la transition se réalise est déterminée par la stabilité relative des patrons. On voit ainsi l'importance capitale que revêt la notion de stabilité dans une description dynamique du comportement.

Une fois ce phénomène d'auto-organisation mis en évidence, il faut encore le formaliser par un modèle mathématique. La première étape consiste à identifier la variable qui traduit exactement ce passage spontané d'un état stable à un autre. Parmi toutes les mesures du comportement qui peuvent être réalisées *a priori*, par exemple l'amplitude, la vitesse ou la fréquence des mouvements (on voit dans la *figure 1A* que ces aspects du comportement ne sont pas constants), une seule variable, la différence de phase ou phase relative entre les deux doigts, semble rendre compte précisément du phénomène observé. En bref, la phase relative est une mesure de la synchronisation, du décalage temporel entre les doigts, prenant une valeur de 0° pour le patron en phase et 180° pour celui en anti-phase. Comme l'illustre la *figure 1B*, lors de la transition de la coordination en phase à la coordination en anti-phase, on observe le passage d'une valeur de la phase relative oscillant autour de 180° à une valeur centrée autour de 360° ou son strict équivalent 0° . De plus, les fluctuations de cette mesure semblent aller de pair avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à un point critique auquel la transition a lieu, pour chuter de manière notable une fois le patron en phase apparu. Il semble donc que cette transition résulte de la perte de stabilité du patron initial, qui fait que le système ne peut que « tomber » dans l'autre patron resté stable. C'est un signe que ce changement de patron de coordination est, comme nous l'avions postulé, la solution auto-organisée que le système a mis sur pied pour recouvrer une forme de stabilité suite aux perturbations induites par l'augmentation de la fréquence.

Soulignons encore combien l'expérience de Kelso est cruciale sur le plan méthodologique. D'une part, le seul moyen de découvrir la variable collective, partant la dimension selon laquelle le processus de coordination s'(auto)organise, réside dans la mise en évidence de discontinuités comportementales, de passages brusques d'un mode de coordination à un autre. De simples modulations de certains aspects de la performance en fonction de manipulations expérimentales ne permettent pas de le faire. A l'évidence, dans la *figure 1*, il y a bien des paramètres de la réponse du sujet qui varient avec l'augmentation de la fréquence d'oscillation. Mais seule la phase relative démontre un décrochage soudain et

massif, précédé d'augmentation de la variabilité, signes indéniables qu'elle constitue la variable collective du processus auto-organisationnel sous-jacent. D'autre part, la manière dont un patron de coordination résiste à une influence déstabilisatrice croissante est une mesure de sa stabilité : plus le patron est stable initialement, plus tardive sera la transition. Aussi est-il possible d'évaluer précisément la stabilité des patrons composant la dynamique spontanée en notant à quel niveau la contrainte non spécifique ils se déstabilisent complètement, entraînant une transition vers un patron plus stable. C'est ce type de méthode que nous utiliserons dans l'expérience présentée plus bas.

En résumé, la dynamique du système de coordination entre les doigts, que l'observation du phénomène même nous a poussé à postuler, peut être représentée théoriquement par celle de la phase relative. La phase relative constitue ainsi une variable collective caractérisant les états de coordination que le système des deux doigts en oscillation peut montrer. Le décrochage comportemental du patron en phase au patron en opposition de phase correspond ainsi, sur le plan théorique, à une *transition de phase* ou *bifurcation*, à savoir le passage entre deux régimes distincts de la dynamique. Dans notre cas, à un régime bistable où en phase (0°) et en opposition de phase (180°) sont des *états stables* ou *attracteurs* de la dynamique et où en phase est intrinsèquement plus stable qu'en anti-phase, succède un régime monostable où ne subsiste plus que le patron en phase. Le phénomène a été formalisé (Haken, Kelso, Bunz, 1985, d'où l'appellation consacrée de modèle HKB) par une équation de mouvement de la phase relative, représenté par la variable théorique ϕ selon l'équation (1). Une série de travaux théoriques et expérimentaux (e.g., Kay, Saltzman, Kelso et Schöner 1987 ; Kelso, Scholz et Schöner, 1988 ; Scholz, Kelso et Schöner, 1987 ; Scholz et Kelso, 1990 ; Schöner et Kelso, 1988) ont suivi, testant divers aspects du modèle. Il est à noter au passage que la transition soudaine et abrupte que montrent le comportement et la variable collective au point de transition, en comparaison avec le changement graduel de la fréquence est un signe certain que la dynamique du système (l'équation) est clairement non linéaire.

Une façon de formaliser la dynamique de la phase relative ϕ est de l'exprimer sous forme de son potentiel, à savoir,

$$(1) \quad \phi = - \frac{dV(\phi)}{d\phi} + \sqrt{Q}\xi,$$

où $V(\phi) = -a \cos \phi - b \cos 2\phi$ et $\sqrt{Q}\xi$, est un bruit gaussien de force Q . Cela veut dire que la vitesse de changement de la phase relative est déterminée par la dérivée de l'équation définissant $V(\phi)$ ci-dessus. Le bruit est ajouté pour tenir compte de l'interaction entre la multitude d'éléments composant le système, par exemple aux niveaux anatomique et neuromusculaire, qui agissent comme des forces aléatoires, perturbant le système et entraînant des déviations par rapport aux états stables.

Plus intuitivement, il est possible de visualiser ce potentiel comme un paysage dont la surface est un peu collante et sur lequel une bille se déplacerait librement sous l'effet de la seule gravité. La bille représente l'état courant du système et ses déplacements son évolution au cours du temps, déterminée par la dynamique de la phase relative, ϕ . La *figure 2*

montre le potentiel de la dynamique donnée par l'équation (1) ci-dessus. La valeur du potentiel (en élévation) est donnée en fonction de ϕ (en abscisse), qui varie entre 0° et 360° et est représentée ici, de manière équivalente, entre -90° et $+270^\circ$, et en fonction du rapport entre les paramètres a et b (en profondeur), qui traduit la fréquence d'oscillation. Comme la vitesse y est donnée par l'inverse de la pente de la courbe du potentiel, les états stables de la dynamique correspondent aux points où la pente est nulle, les « vallées » caractérisant ainsi des attracteurs. Les « sommets » sont des répulseurs, sur lesquels la bille ne peut rester en raison des fluctuations dues au bruit et dont elle s'éloigne donc spontanément.

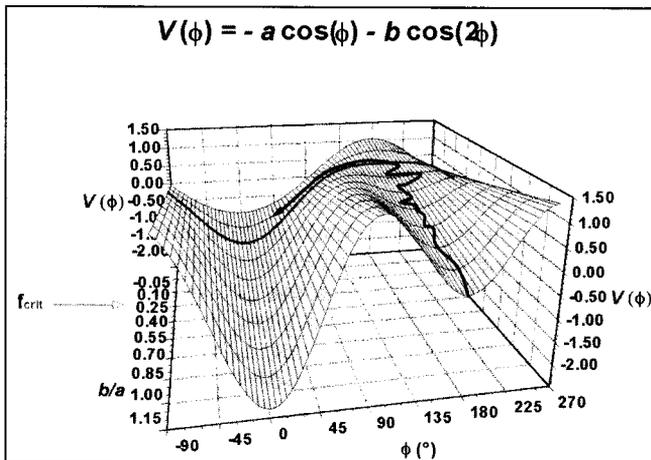


Figure 2. Potentiel de la dynamique de la phase relative selon Haken, Kelso et Bunz (1983).

Nous avons vu qu'en théorie 0° et 180° constituent les états stables ou attracteurs de la dynamique de la coordination bimanuelle. Cela veut dire que, quelle que soit la valeur de la phase relative que le système démontre initialement, il tend à recouvrir inéluctablement le patron en phase ou en anti-phase, en fonction de celui qui est le plus proche ou, comme on le dit techniquement, en fonction du bassin d'attraction dans lequel il se trouve. Cela veut dire aussi que le système compense spontanément d'éventuelles perturbations qui l'éloignent de son état stable. Au fond des vallées, le système va montrer un certain niveau de fluctuations, en raison du bruit qui l'agite continuellement et tend à le sortir de l'état stable. Son niveau d'agitation va être inversement proportionnel à la profondeur de la vallée ou, autrement dit, de la force de l'attracteur qui le ramène au fond d'autant plus vite que la pente est élevée. Ainsi, stabilité et attraction sont les deux faces d'une même propriété de dissipation typique de certains systèmes dynamiques non linéaires.

Continuons maintenant l'exploration de la dynamique de ϕ présentée dans la figure 2. Pour une valeur du rapport a/b élevée (sur « l'avant » de la figure où il vaut environ 1), nous avons deux vallées, deux attracteurs pour des valeurs de phase relative de 0° et 180° . Nous sommes dans le régime bistable de la dynamique de ϕ . Cette représentation illustre bien comment le système va finalement tomber dans l'un ou l'autre de ces attracteurs, en fonction de sa position initiale et se stabiliser à la phase relative que chacun spécifie. La stabilité relative des deux attracteurs est rendue par la

profondeur des vallées, de sorte que, conformément à la réalité des faits expérimentaux, le patron en phase est plus stable que celui en opposition de phase.

Lorsque que a/b diminue, c'est-à-dire que la fréquence d'oscillation augmente (on s'éloigne alors dans la profondeur de la figure), les deux attracteurs à 0° et 180° persistent, bien que le fond des vallées remonte quelque peu, traduisant ainsi leur déstabilisation progressive. Celle-ci est plus importante pour 180° , déjà moins stable originellement, si bien que lorsque $a/b = .25$ (suivre sur la figure 2 la ligne épaissie pour cette valeur), il n'y a plus de vallée à cette valeur de ϕ : l'attracteur en anti-phase a complètement disparu. Le régime de la dynamique est alors monostable, avec seulement un attracteur à 0° . Un tel changement qualitatif de la dynamique est, rappelons-le, une transition de phase, qui intervient lorsque a/b correspond à une fréquence critique d'oscillation (f_{crit}).

Quelles sont maintenant les conséquences de cette évolution de la dynamique sur la coordination des doigts ? Le comportement du système est représenté sur la figure 2 par la ligne continue noire qui court sur la surface. Supposons que nous ayons initialement placé le système dans l'attracteur à 180° . Avec la déstabilisation progressive de ce dernier liée à l'augmentation de fréquence, la pente de la vallée va diminuer et les fluctuations vont croître en conséquence. Au voisinage de f_{crit} , il y a de fortes chances pour qu'une perturbation assez importante survienne qui le « balance » hors de la vallée à 180° (ou ce qui en reste) dans le bassin d'attraction de l'état stable à 0° . En raison de la transition de phase que subit la dynamique sous-jacente, le système passe spontanément du patron en phase au patron en anti-phase : c'est exactement le comportement qu'avait observé Kelso chez ses sujets. C'est ainsi que le modèle HKB, l'équation de mouvement de la phase relative, ϕ , formalise le comportement des doigts et caractérise la dynamique sous-jacente de la coordination bimanuelle.

Soulignons ici le rôle fondamental du bruit dans la transition de phase. D'une part, le décrochage de la phase relative de 180° à 0° qui en résulte ne surviendrait pas sans bruit, car sans ces perturbations stochastiques, le système pourrait se maintenir sur les sommets, d'où le nom de points fixes instables que prennent aussi les répulseurs. D'autre part, sans elles, il n'y aurait pas non plus d'augmentation des fluctuations de la phase relative et du temps de relaxation du système à l'approche de la fréquence critique. Or, ces deux augmentations concomitantes, appelées *phénomènes critiques*, sont les signes mêmes de la nature auto-organisée de la transition de phase. Les contraintes grandissantes qui s'exercent sur le système augmentent le bruit inhérent qui provient de l'interaction entre ses composantes.

En résumé, le modèle HKB défini par l'équation (1) détermine l'équation de mouvement de la phase relative, ϕ , la variable collective de la dynamique sous-jacente à la coordination bimanuelle. Il faut noter encore une fois que cette dynamique émerge alors qu'aucune contrainte spécifique ne stipule une valeur donnée de ϕ , c'est-à-dire une relation de phase précise entre les doigts. En effet, la fréquence d'oscillation des doigts ne détermine en rien la manière dont ils se positionnent l'un par rapport à l'autre. C'est pourquoi nous dirons que le modèle HKB définit la *dynamique spontanée* du système (Zanone et Kelso, 1992).

Toutefois, et fort heureusement, il est tout à fait possible d'influencer, voire de modifier cette dynamique d'une manière spécifique, par l'intention, l'attention, la mémoire ou une tâche spécifiant une phase relative donnée à réaliser. On peut, par exemple, demander à un sujet de réaliser une phase relative de 0° ou 180°, qui existent déjà dans sa dynamique spontanée. Cette tâche renforce un attracteur préexistant qui devient plus profond et stabilise d'autant plus le patron correspondant. Le poids relatif des attracteurs est de la sorte modifié, jusqu'à ce que, si cette stabilisation est très importante, un seul attracteur demeure stable. Voilà comment, d'un point de vue dynamique, s'effectue la sélection d'un patron spontané (par exemple, un cheval qui passe du trot au galop ou inversement). On parle alors d'un régime de *coopération*, car la tâche coïncide avec un patron que le système « sait faire ». A l'inverse, quand la tâche requiert une coordination étrangère à la dynamique spontanée du système, par exemple 90° de phase relative, il s'installe alors un régime de *compétition*. En raison de cette compétition, la stabilité du patron à réaliser est fortement perturbée, si bien que la variabilité autour de la phase relative requise est importante et la précision mauvaise. Cela veut dire que s'il est toujours possible de forcer le système au-delà de ce que sa dynamique spontanée préconise, cela ne va pas sans un prix en termes de performance (Zanone et Kelso, 1992) et de coût attentionnel (Temprado, Zanone, Monno, Laurent, 1999). Cela veut dire aussi que cette compétition ne peut disparaître que lorsque la tâche initialement en concurrence avec la dynamique spontanée s'intègre à cette dernière : ceci implique forcément une altération de la dynamique spontanée, c'est-à-dire une transition de phase. C'est ainsi que l'on peut caractériser théoriquement l'apprentissage, le mécanisme adaptatif par lequel une nouvelle forme comportementale est acquise par un organisme (Zanone et Kelso, 1992, 1997 ; Zanone, 1999).

L'existence de ces deux régimes d'interaction entre la dynamique spontanée et une tâche spécifique a une conséquence cruciale sur le plan méthodologique. Renversons le problème : si on ne connaît pas la dynamique spontanée, c'est-à-dire la localisation et la force des attracteurs, les tâches pour lesquelles la précision sera maximale et la variabilité minimale nous permettront de détecter la présence d'attracteurs sous-jacents (Zanone et Kelso, 1992, 1997). Notons toutefois que cette technique d'évaluation de la dynamique de coordination ne peut, bien évidemment, être employée que si l'on connaît déjà la variable collective caractérisant les patrons de coordination ou, autrement dit, l'espace dans lequel, ou la dimension selon laquelle, le système s'(auto)organise.

C'est dans ce cadre général que s'inscrit l'expérience que nous allons présenter. Conformément au cadre théorique que nous venons d'exposer, la coordination bimanuelle peut être décrite par la dynamique sous-jacente de la phase relative, qui détermine la stabilité des patrons de coordination et les règles de passage entre eux. Notre hypothèse est que si les sujets porteurs d'un trouble d'acquisition des coordinations (TAC) se caractérisent par des troubles de la coordination, alors ceux-ci doivent se manifester en termes de dynamique de la coordination. Nous allons donc soumettre des sujets TAC à une expérience à la Kelso, en leur imposant de produire des patrons en anti-phase à des vitesses d'oscillation croissantes. Ainsi nous obtiendrons une première

approximation de la dynamique de coordination sous-jacente.

PRÉSENTATION DE L'EXPÉRIENCE

Compte tenu des données de la littérature et des observations cliniques sur les populations d'enfants présentant un trouble d'acquisition de la coordination nous attendons des coordinations bimanuelles spontanées différentes de celles retrouvées dans la population générale, avec notamment une coordination en anti-phase moins stable.

Méthode

Population

Cinq enfants porteurs d'un Trouble d'Acquisition de la Coordination, âgés de 7 à 12 ans, sont sélectionnés selon les critères suivants :

- un score total à l'échelle de développement psychomoteur de Lincoln-Oseretsky (LOMDS, Rogé, 1984) inférieur d'au moins deux écarts-types à la moyenne de la tranche d'âge considérée ;
- un Quotient Intellectuel Total, au WISC-III, supérieur à 70 ;
- une absence de lésion neurologique avérée et de trouble oppositionnel.

Les informations concernant la réalisation des activités quotidiennes sont collectées auprès du sujet, de la famille ou des intervenants lorsqu'une prise en charge est en cours. Les sujets pathologiques sont appariés en âge à cinq sujets contrôles.

Les conditions expérimentales et la procédure

L'expérience se déroule dans un CMPP de la région toulousaine, ainsi qu'au LARAPS.

Les enfants doivent effectuer trois essais de trente secondes chacun dans le mode de coordination en anti-phase : le premier essai est réalisé à vitesse spontanée, les deux suivants avec une consigne d'accélération.

L'enfant est assis dans une pièce calme devant une table sur laquelle se trouvent deux manettes de jeu (*joysticks*) reliées à un ordinateur. Il doit poser ses coudes sur la table et tenir les manettes à pleine main. Il ne peut pas voir l'écran où est retranscrit la trajectoire de déplacement de chacune des mains.

On donne les consignes suivantes au premier essai : « *Tu dois bouger les manettes en même temps, pas l'une après l'autre* (démonstration) ; *au même rythme, regarde les deux mains doivent avoir la même vitesse* (démonstration) ; *dans un seul plan, de droite à gauche* (démonstration). *Essaie de ne pas toucher la butée* (démonstration). *Fais ceci le plus longtemps possible* (trois minutes), *jusqu'à ce que je te dise stop.* »

Les démonstrations sont effectuées, soit avec les joysticks, soit à l'aide de bâtonnets.

Pour les deux derniers essais, la consigne générale est : « *Tu vas faire la même chose que précédemment mais essaie d'aller plus vite.* » Au cours de la réalisation de la tâche, des incitations modérées sont apportées régulièrement.

Dépouillement des résultats

Après l'enregistrement de toutes les données, nous visualisons les courbes retraçant le mouvement des deux mains, grâce à un logiciel spécifique. Nous procédons ensuite à l'identification des moments correspondant à la complétion d'un cycle complet d'oscillation pour chacun des doigts. Nous calculons, puis enregistrons la phase relative, ainsi que ses statistiques, avec celles de la durée d'un cycle. Finalement, pour chacun des essais, nous relevons les données suivantes :

- le temps maximum de maintien du patron en anti-phase et en phase, puis le pourcentage de ce temps en fonction du temps total (variable en fonction des essais) ;
- le nombre de fois où le sujet passe d'un patron à un autre ou nombre de « *switchs* » (deux cycles au minimum) ;
- la moyenne et l'écart type de la durée maximale pendant laquelle le sujet est resté en anti-phase et en phase.

Résultats

Description et observations des sujets porteurs d'un TAC

Cette partie vise à caractériser chacun des sujets TAC à l'aide de l'examen psychomoteur, des renseignements sur les activités de la vie quotidienne et les résultats qualitatifs observés lors de la tâche expérimentale.

• Audrey

Audrey est âgée de 7 ans 4 mois au moment de l'expérimentation.

Elle obtient -3,4 DS à l'échelle de développement psychomoteur de Lincoln-Oseretsky (LOMDS), avec des déficits aux facteurs F1 (contrôle-précision au niveau manuel), F2 (coordinations générales), F3 (activités alternatives des membres), F4 (vitesse doigt-poignet), F5 (équilibre), F8 (coordinations manuelles). Il faut également noter qu'elle présente un trouble déficitaire de l'attention associé à la dyspraxie.

L'initialisation de la tâche expérimentale s'effectue d'emblée en anti-phase pour l'essai 1 et 2, à la différence de l'essai 3. La vitesse d'exécution est rapide dès le début mais elle se ralentit par la suite et ceci malgré la consigne d'accélération (il semblerait que cela constitue une stratégie adaptative). On note, dès le premier essai, une grande irrégularité : arrêts du mouvement des mains, *switchs* (passage d'un patron de coordination à un autre), instabilités (un cycle où le sujet n'est plus en anti-phase).

Audrey passe d'un attracteur à un autre, cependant elle semble passer beaucoup de temps en phase et elle a tendance à initier la tâche dans ce mode de coordination. On peut émettre l'hypothèse d'un attracteur à 0° très puissant ou un attracteur à 180° très faible. Mais, le déficit attentionnel peut être à l'origine d'une telle irrégularité.

• Léa

Léa est âgée de 8 ans. Le score au LOMDS est de -2,5 DS et tous les facteurs sont touchés.

De nombreuses perturbations sont signalées au quotidien : elle se cogne, chute fréquemment et a des difficultés à monter les escaliers.

La tâche expérimentale est réalisée d'emblée à une fréquence élevée, puis la vitesse a tendance à se stabiliser. Elle

commence indifféremment en phase ou en anti-phase : lorsqu'elle débute en phase elle tend à y rester, et quand elle initie les oscillations en anti-phase elle a tendance à *switcher* pour retourner en phase. Ses productions semblent être indépendantes de la fréquence. Il semble que le patron en phase soit plus puissant.

• Louis

Louis est âgé de 8 ans 11 mois au moment de l'expérience. L'échelle de développement de Lincoln Oseretsky (LOMDS) fait apparaître un score global de -5 DS avec des difficultés dans l'ensemble des facteurs.

Il est décrit par sa mère comme ayant des difficultés (notamment d'équilibre) dans les activités physiques et sportives. Louis est stimulé pour poursuivre ses efforts dans cette discipline.

Globalement, on peut noter que Louis réalise tout de suite un patron en anti-phase mais son tempo spontané est lent. Il y a effectivement augmentation de la fréquence oscillatoire et celle-ci influence fortement l'apparition des perturbations : *switchs* et instabilités.

Le passage est fréquent entre les patrons de coordination en anti-phase et en phase, au cours de l'essai 3. La non-stabilisation dans un des modes de coordination laisse à penser que le paysage des attracteurs est plat.

• Jonathan

Jonathan est âgé de 8 ans 11 mois. Son niveau au LOMDS est inférieur à -2 DS.

Il présente une vitesse d'exécution assez rapide qui augmente conformément à la consigne. Au premier essai, il ne parvient pas à effectuer le patron en anti-phase. Au deux autres essais, Jonathan débute en anti-phase mais opère rapidement une transition pour rester dans le mode en phase. Jonathan a tendance à initier la tâche en phase et il semble être en difficulté pour maintenir le mode de coordination en anti-phase. On peut donc émettre l'hypothèse d'un attracteur à 0° très puissant ou d'un attracteur à 180° très faible.

• Gaëtan

Gaëtan est âgé de 9 ans. Le score au LOMDS est de -2 DS. Les facteurs concernés par ce déficit sont : F1, F3, F5 et F8.

Gaëtan présente une vitesse élevée qui augmente au cours des essais. Cependant, globalement, il initie bien le mouvement en anti-phase et il apparaît relativement stable dans ce mode de coordination (quelques arrêts de main ou instabilités).

Gaëtan débute et maintient le patron en anti-phase sans grande irrégularité. On peut penser que le paysage des attracteurs n'est pas très différent de celui de la population générale ; probablement un peu plus plat.

En résumé, ce type de coordination bimanuelle apparaît difficile pour ces enfants et il a été nécessaire, le plus souvent, de répéter les consignes. La consigne de vitesse entraîne des effets contrastés : augmentation de la fréquence d'exécution chez certains sujets et diminution chez d'autres. Nous pouvons postuler, à partir de ces données, la présence de deux groupes de sujets porteurs d'un TAC : ceux qui possèdent un paysage des attracteurs plat et ceux qui pré-

sentent un attracteur à 0° très puissant ou un attracteur à 180° très faible.

Observation comparative du tableau de données

• *Tempo*

Si on compare la vitesse spontanée (essai 1) des sujets TAC à celle des enfants contrôles, on note qu'ils sont globalement plus rapides que leurs homologues issus de la population générale, à l'exception d'un sujet (Louis).

• *Changement spontané de patron (switchs)*

Contrairement à ceux du groupe contrôle, les sujets TAC changent de patron au cours de l'essai : au moins une fois pour chaque sujet pathologique alors qu'un seul sujet contrôle passe d'un patron de coordination à un autre.

• *Influence de la fréquence sur les performances*

Lorsque l'on considère le temps passé en anti-phase et en phase par rapport à l'élévation de la fréquence d'oscillation des mains, on observe une augmentation de l'instabilité chez quatre des TAC et uniquement chez un sujet du groupe contrôle.

Globalement, plus la fréquence augmente, moins les enfants TAC parviennent à maintenir le patron en anti-phase et plus ils ont tendance à rester en phase.

• *Influence de l'âge sur les résultats*

Si on étudie les pourcentages du temps passé en anti-phase et en phase par rapport à l'âge des sujets, il ne semble pas y avoir d'effet de l'âge sur les performances, même si les sujets les plus jeunes semblent être les plus instables dans ce type de tâche.

• *Influence du niveau au LOMDS*

En comparant, chez les TAC, les résultats obtenus à l'échelle du Lincoln-Oseretsky avec le pourcentage du temps passé en anti-phase (pour des fréquences comparables), on remarque que plus le score au LOMDS est élevé, plus le sujet parvient à maintenir le patron en anti-phase. Ainsi, Louis et Audrey, qui ont les scores au LOMDS les plus bas, sont également ceux qui passent le moins de temps en anti-phase.

Analyse statistique

Ces données sont compactées dans un bloc contenant les trois essais puis elles sont soumises à une analyse de variance 2×3 (Groupes \times Essais) avec mesure répétée sur le facteur Essai, à l'aide du logiciel SuperAnova.

• *Pourcentage de temps passé en phase*

On ne retrouve pas de différence significative pour le pourcentage de temps passé en phase entre les deux groupes

$$(F(1,16) = 3,9 ; ns).$$

• *Pourcentage de temps passé en anti-phase*

On trouve un effet significatif du facteur Groupe

$$(F(1,16) = 7,2 ; p < 0,05).$$

La moyenne du pourcentage de temps des enfants TAC est de 50,9 % contre 92 % pour le groupe contrôle. Le facteur Essai n'a pas d'effet significatif ($F < 1$).

• *Nombre de transitions (switchs)*

On ne retrouve aucun effet significatif du facteur Groupe concernant le nombre de *switchs*

$$(F(1,16) = 2,4 ; ns).$$

• *Moyenne de la durée maximale en anti-phase*

On ne retrouve aucun effet significatif du facteur Groupe pour la moyenne en anti-phase ($F < 1$).

• *Ecart type de la durée maximale en anti-phase*

Il n'y a aucun effet significatif du facteur Groupe, ni du facteur Essais ($F < 1$).

• *Fréquence*

On ne retrouve pas de différence significative entre les fréquences d'exécution pour les deux groupes ($F < 1$).

Nous avons également réalisé une analyse de covariance avec la fréquence comme facteur covariant. La différence de pourcentage de temps passé en anti-phase est significative entre les deux groupes et ceci est indépendant de la fréquence

$$(F(1,16) = 3,6 ; p < 0,05).$$

Discussion

Jusqu'à présent, une seule étude (Volman et Geuze, 1998) a utilisé le modèle théorique dynamique pour essayer de caractériser la coordination chez les sujets porteurs d'un TAC. L'expérience consiste en la réalisation de mouvements de flexion-extension des index des deux mains et ceci dans trois conditions. Dans un premier temps, les enfants doivent produire des mouvements de leur choix (soit en phase, soit en anti-phase), suivant une fréquence constante, imposée par l'expérimentateur. Puis, dans un second temps, ils doivent maintenir le même rythme, malgré la perturbation qu'on leur fait subir. Enfin, on leur demande de réaliser un patron en anti-phase, mais suivant un rythme donné par un signal sonore et dont la fréquence augmente progressivement. L'analyse statistique fait apparaître une différence significative entre le groupe contrôle et le groupe pathologique : en effet, la phase relative des enfants présentant un trouble d'acquisition des coordinations est nettement plus variable que celle des enfants contrôles, notamment dans le mode de coordination en anti-phase. De plus, les enfants pathologiques présentent un temps de relaxation plus élevé après une perturbation et surtout dans le mode anti-phase ainsi qu'un passage d'un mode de coordination à un autre, à des fréquences plus basses. En s'appuyant sur ces deux conclusions, les auteurs suggèrent la présence d'attracteurs moins puissants chez les TAC.

Notre étude permet de dégager quelques conclusions qui précisent la nature du trouble de la coordination.

Sur un plan comportemental, la coordination motrice des enfants TAC est qualitativement différente et les difficultés à réaliser une coordination sont présentes à tout âge. On retrouve ici l'idée développée par Sigmundson, Ingvaldsen et Whiting (1997) qui explorent l'hypothèse d'un retard de développement chez les enfants TAC à travers une tâche de coordination oculomanuelle. Les auteurs postulent que dans le cas d'un retard, on ne devrait pas trouver de différences entre la performance d'enfants normaux de 5 ans et les enfants maladroits de 8 ans. Or les études mettent en évidence des différences de performance entre les deux groupes. Les enfants TAC de 8 ans sont moins performants surtout avec la main non dominante.

Dans une optique dynamique, trois cas de figure se présentent. Premièrement, les enfants porteurs d'un TAC passent peu de temps dans le patron en anti-phase alors que les enfants contrôles restent en général dans le patron en anti-phase durant toute la durée de l'essai et ceci à vitesse similaire. D'un point de vue dynamique, cela suggère chez les enfants TAC que le patron en anti-phase est très peu stable comparativement au patron en phase. Si l'on se reporte à la *figure 2* cela se traduirait par une vallée très profonde à 0° et une petite déflexion à 180°.

Un second comportement caractéristique de nos sujets est la présence de transitions répétées d'un patron à l'autre. Un des enfants du groupe contrôle, affecté par ailleurs d'une dyslexie, présente aussi ce comportement, ce qui pose le problème de son inclusion dans le groupe contrôle du fait de la fréquente association (de l'ordre de 22 % à 27 % selon les études) entre trouble d'acquisition de la coordination et dyslexie (Kaplan *et al.*, 1998 ; Mæland *et al.*, 1993 ; Rintala *et al.*, 1998). Quoi qu'il en soit, on peut en conclure, théoriquement que le paysage dynamique qui caractérise la motricité de ces enfants est plus plat que pour les autres sujets. Si l'on utilise la représentation de la *figure 2*, les deux vallées seraient présentes mais très peu marquées. La moindre perturbation entraîne alors une transition d'un patron de coordination vers l'autre. Mais comme cet attracteur est également faible, le phénomène se poursuit et on observe ainsi une tendance à des transitions continues.

Enfin, chez un enfant du groupe pathologique (Audrey), on remarque que, si le temps passé dans le patron en anti-phase est identique à celui passé dans le patron en phase, elle passe beaucoup de temps sur des patrons qui ne correspondent à aucun des deux premiers. Une représentation dynamique de ce trouble est la présence, à côté des attracteurs à 0° et 180° de même profondeur, d'autres attracteurs à d'autres valeurs : c'est ce que l'on appelle un régime de multi-stabilité. Le passage incessant de l'un à l'autre suggère par ailleurs une faible stabilité des patrons correspondants. La présence associée d'un trouble de l'attention chez cette enfant constitue apparemment une grande perturbation et semble être directement à l'origine de la maladresse rencontrée. Des études ont déjà exploré cette problématique et montrent que nombre de troubles moteurs sont secondaires à un trouble déficitaire de l'attention (Landgren *et al.*, 1998). De plus, une étude récente menée par Kadesjö et Gillberg (1998) revient sur cette association fréquente entre trouble déficitaire de l'attention/hyperactivité (ADH/D) et trouble d'acquisition de la coordination, dénommée déficit au niveau de l'attention, de la perception et du contrôle moteur. Il s'agit là d'une piste à poursuivre visant à identifier l'asso-

ciation entre TAC et ADH/D sous la forme d'une dynamique multi-stable de faible attractivité.

Cette étude renforce, par une vue dynamique, l'hétérogénéité déjà mentionnée par un grand nombre d'auteurs (Albaret, 1999 ; Dewey et Kaplan, 1994 ; Gérard et Dugas, 1991 ; Hoare, 1994 ; Miyahara, 1994 ; Stambak *et al.*, 1964).

Sur le plan quantitatif, les deux sujets dont le score à l'échelle de développement psychomoteur de Lincoln-Oseretsky est le plus bas et les difficultés quotidiennes les plus importantes sont ceux qui restent le moins longtemps dans le patron en anti-phase. Cette coordination, qui fait partie des coordinations difficiles, semble donc être un bon indicateur d'un éventuel trouble d'acquisition des coordinations et peut servir de signal d'alerte pour un thérapeute soucieux d'évaluer son sujet. On peut noter que l'utilisation de manettes n'est pas obligatoire et que des coordinations similaires existent déjà dans les échelles de développement utilisées chez l'enfant, par exemple le LOMDS (Rogé, 1984). Cette conclusion est de plus congruente avec les données de la littérature qui s'accordent pour affirmer que les troubles apparaissent d'une manière prépondérante lors de coordinations difficiles.

Enfin, nous pouvons distinguer deux groupes d'enfants eu égard à la vitesse d'exécution : des sujets lents et incoordonnés et des sujets rapides et également incoordonnés. La lenteur d'exécution, décrite par un grand nombre d'auteurs (Van Dellen et Geuze, 1988 ; Henderson, 1992), ne semble donc pas être une caractéristique commune à tous les enfants TAC. Nous pouvons, de plus, noter que le sujet le plus lent est aussi le moins stable, alors que le plus rapide est le plus stable. Ainsi, la lenteur, préférée spontanément par certains enfants, n'est pas un gage de stabilité dans la réalisation d'une coordination plus complexe (patron en anti-phase).

En conclusion, l'interprétation du profil moteur obtenu et la façon dont le sujet fait face aux exigences de rapidité peut aider le thérapeute à choisir les moyens à mettre en œuvre pour aider l'enfant maladroit. Pour certains, il sera nécessaire d'intervenir directement sur les processus attentionnels à l'origine de l'incoordination, pour d'autres il faudra parvenir à mettre l'enfant dans des situations qui favorisent la stabilité de la coordination, ou bien partir de ce que l'enfant sait déjà faire et qui possède un certain degré de stabilité. Une seule étude concernant l'apprentissage d'une coordination alternée (en anti-phase) a été réalisée récemment avec des enfants âgés de 6 à 8 ans (Volman, 1997). Durant quatre jours les enfants se sont exercés sur cette tâche de coordination à raison d'une demi-heure par jour. Les résultats montrent que l'exercice améliore la stabilité de la coordination de façon significative. Cette étude ouvre des perspectives qu'il reste à vérifier chez l'enfant TAC.

RÉFÉRENCES

- ALBARET (J.M.) : « Troubles de l'acquisition de la coordination : perspectives actuelles des dyspraxies de développement », *Evolutions Psychomotrices*, 11, 45, 1999, pp. 123-129.

- ALBARET (J.M.), CARAYRE (S.), SOPPELSA (R.), MICHELON (Y.) : « Hétérogénéité des dyspraxies de développement : tentative de classification », *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 7, 32, 1995, pp. 61-67.
- ALBARET (J.M.), « Les troubles psychomoteurs chez l'enfant », *Encyclopédie Médico-Chirurgicale*, Paris, Elsevier, 2000.
- American Psychiatric Association : *DSM IV, Diagnostic and statistical manual of mental disorders* (4^e ed.), Washington, DC, American Psychiatric Association, 1994 (trad. franç. Paris, Masson, 1996).
- BERNSTEIN (N.S.) : *The co-ordination and regulation of movements*, Oxford, Pergamon, 1967.
- BRAIN (W.R.) : *Speech disorders : aphasia, apraxia and agnosia*, Londres, 1961.
- DALLA PIAZZA (S.) : *L'Enfant prématuré*, Bruxelles, De Boeck, 1997.
- CORRAZE (J.) : *Les Troubles psychomoteurs*, Marseille, Solal, 1999.
- DEWEY (D.), KAPLAN (B.J.) : « Subtyping of developmental motor deficits », *Developmental Neuropsychology*, 10, 3, 1994, pp. 265-284.
- DUPRÉ (E.) : *Pathologie de l'imagination et de l'émotivité*, Paris, Payot, 1925.
- FORD (F.R.) : *Diseases of The nervous system in infancy, childhood and adolescence* (4^e ed.), Springfield IL., Charles C. Thomas, 1960.
- GÉRARD (C.), DUGAS (M.) : « Dyspraxie de développement : proposition de typologie. A propos de 51 cas », *Ann. Réadaptation Méd. Phys.*, 34, 1991, pp. 325-332.
- GEUZE (R.H.), KALVERBOER (A.F.) : « Bimanual rhythmic coordination in clumsy and dyslexic children », in S. Valenti et J. Pittenger (Eds.), *Studies in perception and action* (pp. 24-28), Hillsdale, Lawrence Erlbaum, 1993.
- GUBBAY (S.S.), ELLIS (E.), WALTON (J.N.), COURT (S.D.M.) : « Clumsy children : a study of apraxic and agnosic defects in 21 children », *Brain*, 88, 1965, pp. 295-312.
- GUBBAY (S.S.) : *The clumsy child*, Philadelphia, Saunders, 1975.
- GUBBAY (S.S.) : « The management of developmental apraxia », *Developmental Medicine and Child Neurology*, 20, 1978, pp. 643-646.
- HAKEN (H.) : *Synergetics, an introduction: Non-equilibrium phase transitions and self-organization in physics, chemistry and biology*, Berlin, Springer, 1983.
- HAKEN (H.), KELSO (J.A.S.), BUNZ (H.) : « A theoretical model of phase transitions in human hand movements », *Biological Cybernetics*, 51, 1985, pp. 347-356.
- HENDERSON (L.), ROSE (P.), HENDERSON (S.E.) : « Reaction time and movement time in children with a developmental coordination disorder », *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 33, 1992, pp. 895-905.
- HENDERSON (S.E.) : « Clumsiness or developmental coordination disorder : a neglected handicap », *Current Paediatrics*, 2, 1992, pp. 158-162.
- HENDERSON (S.E.), HALL (D.) : « Concomitants of clumsiness in young school children », *Developmental Medicine and Child Neurology*, 24, 1982, pp. 448-460.
- HOARE (D.) : « Subtypes of developmental coordination disorder », *Adapted Physical Activity Quarterly*, 11, 1994, pp. 158-169.
- HULME (C.), SMART (A.), MORAN (G.) : « Visual perceptual deficits in clumsy children », *Neuropsychologia*, 20, 1982, pp. 475-481.
- JEANNEROD (M.) : *Le Cerveau-machine. Physiologie de la volonté*, Paris, Fayard, 1993.
- JOHNSTON (O.), SHORT (H.), CRAWFORD (J.) : « Poorly coordinated children: a survey of 95 cases », *Child : Care, Health and Development*, 13, 1987, pp. 361-376.
- KADESJÖ (B.), GILLBERG (C.) : « Developmental coordination disorder in swedish 7-year-old children », *J. Am. Acad. Child Adolesc. Psychiatry*, 38, 7, 1999, pp. 820-828.
- KAPLAN (B.J.), WILSON (B.N.), DEWEY (D.), CRAWFORD (S.G.) : « DCD may not be a discrete disorder », *Human Movement Science*, 17, 1998, pp. 471-490.
- KAY (B.A.), KELSO (J.A.S.), SALTZMAN (E.L.), SCHÖNER (G.S.) : « The space-time behavior of single and bimanual movements: Data and limit cycle model », *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 13, 1987, pp. 178-192.
- KEELE (S.) : « Movement control in skilled motor performance », *Psychological Bulletin*, 70, 1968, pp. 387-403.
- KELSO (J.A.S.) : « Phase transition and critical behavior in human bimanual coordination », *American Journal of Physiology*, 15, R1000-R1004, 1984.
- KELSO (J.A.S.) : « The informational character of self-organized coordination », *Human Movement Science*, 13, 1994, pp. 393-413.
- KELSO (J.A.S.) : *Dynamic pattern. The self-organization of brain and behavior*, Cambridge, MA, MIT Press, 1995.
- KELSO (J.A.S.), SCHOLZ (J.P.), SCHÖNER (G.S.) : « Dynamics governs switching among patrons of coordination in biological movement », *Physics Letters*, A134(1), 1988, pp. 8-12.
- KNUCKEY (N.W.), APSIMON (T.T.), GUBBAY (S.S.) : « Computerized axial tomography in clumsy children with developmental apraxia and agnosia », *Brain Development*, 5, 1983, pp. 14-19.
- LANDGREN (M.), KJELLMAN (B.), GILLBERG (C.) : « Attention deficit disorder with developmental coordination disorders », *Archives of Disease in Childhood*, 79, 1998, pp. 207-212.
- LARKIN (D.), HOARE (D.) : « The movement approach : a window to understanding the clumsy child », in J.J. Summers (Ed.), *Approaches to the study of motor control and learning*, Amsterdam, North Holland, 1992.
- LASZLO (J.I.), BAIRSTOW (P.J.), BARTRIP (J.), ROLFE (V.T.) : « Clumsiness or perceptuo-motor dysfunction ? », in A. Colley et J. Beech (Eds.), *Cognition and action in skilled behaviour*, Amsterdam, North-Holland, 1988, pp. 293-316.
- LESNY (I.A.) : « Developmental dyspraxia-dysgnosia as a cause of congenital children's clumsiness », *Brain & Development*, 2, 1980, pp. 69-71.
- MÆLAND (A.F.), SØVIK (N.) : « Children with motor coordination problems and learning disabilities in reading, spelling, writing and arithmetic », *European Journal of Special Needs Education*, 8, 2, 1993, pp. 81-98.
- MISSIUNA (C.) : « Motor skill acquisition in children with developmental coordination disorder », *Adapted Physical Activity Quarterly*, 11, 1994, pp. 214-235.
- MIYAHARA (M.) : « Sub-types of learning disabled students based upon gross motor functions », *Adapted Physical Activity Quarterly*, 11, 1994, pp. 368-382.
- NEWHAM (C.), MCKENZIE (B.E.) : « Crossmodal transfer of sequential visual and haptic shape information by clumsy children », *Perception*, 22, 1993, pp. 1 061-1 073.
- Organisation Mondiale de la Santé : *CIM 10, Classification internationale des troubles mentaux et des troubles du comportement, Chapitre V (F) : troubles mentaux et troubles du comportement*, Paris, Masson, 1992.
- ORTON (S.T.) : *Reading, writing and speech problems in children*, New York, W.W. Norton, 1937.
- PAILLARD (J.) : « Apraxia and the neurophysiology of motor control », *Philosophical Transactions of the Royal Society*, B298, 1982, pp. 11-134.
- PRIGOGINE (I.), STENGERS (I.) : *La Nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard, 1979.
- REUBEN (R.N.), BAKWIN (H.) : « Developmental clumsiness », *Pediatric Clinics of North America*, 15, 3, 1968, pp. 601-610.
- RINTALA (P.), PIENIMÄKI (K.), AHONEN (T.), CANTELL (M.), KOOISTRA (L.) : « The effects of psychomotor training programme

- on motor skill development in children with developmental language disorders », *Human Movement Science*, 17, 1998, pp. 721-737.
- ROGÉ (B.) : *Manuel de l'échelle de développement psychomoteur de Lincoln-Oseretsky*, Paris, Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée, 1984.
- SCHMIDT (R.A.) : « A schema theory of discrete motor skill learning », *Psychological Review*, 82, 1975, pp. 225-260.
- SCHOLZ (J.P.), KELSO (J.A.S.) : « Intentional switching between patterns of bimanual coordination depends on the intrinsic dynamics of the patterns », *Journal of Motor Behavior*, 22, 1, 1990, pp. 98-124.
- SCHOLZ (J.P.), KELSO (J.A.S.), SCHÖNER (G.S.) : « Non-equilibrium phase transitions in coordinated biological motion: Critical slowing down and switching time », *Physics Letters*, A123, 1987, pp. 390-394.
- SCHÖNER (G.S.), KELSO (J.A.S.) : « Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. A dynamic theory of behavioral change », *Science*, 239, 1988, pp. 1513-1520.
- SIGMUNDSSON (H.), INGVALDSEN (R.P.), WHITING (H.T.A.) : « Inter- and intra-sensory modality matching in children with hand-eye co-ordination problems », *Experimental Brain Research*, 114, 1997, pp. 492-499.
- SKORJI (V.), MCKENZIE (B.E.) : « How do children who are clumsy remember modelled movements ? », *Developmental Medicine and Child Neurology*, 39, 1997, pp. 404-408.
- STAMBAK (M.), L'HÉRITTEAU (D.), AUZIAS (M.), BERGÈS (J.), AJURIAGUERRA (J. DE) : « Les dyspraxies chez l'enfant », *Psychiatrie de l'Enfant*, 7, 2, 1964, pp. 381-496.
- SUGDEN (D.A.), KEOGH (J.F.) : *Problems in movement skill development*, Columbia, University of South Carolina Press, 1990.
- TEMPRADO (J.J.), ZANONE (P.G.), MONNO (A.), LAURENT (M.) : « Attentional load associated with performing and stabilizing preferred bimanual patterns », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25, 1999, pp. 1579-1594.
- VAN DELLEN (T.), GEUZE (R.H.) : « Motor response processing in clumsy children », *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 29, 1988, pp. 489-500.
- VAN DER MEULEN (J.H.P.), DENIER VAN DE GON (J.J.), GIELEN (C.C.A.M.), GOOSKENS (R.H.J.), WILLEMSE (J.) : « Visuomotor performance of normal and clumsy children II: Arm-tracking movements with and without visual feedback », *Developmental Medicine and Child Neurology*, 33, 1991, pp. 118-129.
- VIVIANI (P.), TERZUOLO (C.) : « The organization of movement in handwriting and typing », in : B. Butterworth (Ed.), *Language production, vol. II - Development, writing and other language processes*, New York, Academic Press, 1983.
- VOLMAN (M.J.M.) : *Rhythmic coordination dynamics in children with and without Developmental Coordination Disorder*, PhD thesis, University of Groningen, 1997.
- VOLMAN (M.J.M.), GEUZE (R.H.) : « Relative phase stability of bimanual and visuomotor rhythmic coordination patterns in children with a Developmental Coordination Disorder », *Human Movement Science*, 17, 1998, pp. 541-572.
- WALL (A.E.) : « Physically awkward children: a motor development perspective », in : J.P. Das, R.F. Mulcahy, A.E. Wall (Eds.), *Theory and research in learning disabilities*, New York, Plenum Press, 1982.
- WALTON (J.N.), ELLIS (E.), COURT (S.D.M.) : « Clumsy children: a study of developmental apraxia and agnosia », *Brain*, 85, 1962, pp. 603-613.
- WANN (J.P.) : « Handwriting disturbances : developmental trends », in : H.T.A. Whiting et M.G. Wade (Eds.), *Themes in motor development*, Dordrecht, Martinus Nijhoff, 1986, pp. 207-223.
- WILLIAMS (H.G.), MC CLENAGHAN (P.E.D.), WARD (R.S.) : « Duration of muscle activity during standing in normally and slowly developing children », *American Journal of Physical Medicine*, 64, 1985, pp. 171-189.
- WILLIAMS (H.G.), WOOLLACOTT (M.H.), IVRY (R.) : « Timing and motor control in clumsy children », *Journal of Motor Behavior*, 2, 1992, p. 165-172.
- WILSON (P.H.), MCKENZIE (B.E.) : « Information processing deficits associated with Developmental Coordination Disorder: A meta-analysis of research findings », *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 39, 1998, pp. 829-840.
- WILSON (P.H.), MARUFF (P.) : « Deficits in the endogenous control of covert visuospatial attention in children with developmental coordination disorder », *Human Movement Science*, 18, 1999, pp. 421-442.
- ZANONE (P.G.) : « Une approche écologique-dynamique de la coordination », in : J.M. Albaret et R. Soppelsa (Eds.), *Précis de rééducation de la motricité manuelle*, Marseille, Solal, 1999, pp. 29-54.
- ZANONE (P.G.), KELSO (J.A.S.) : « The evolution of behavioral attractors with learning: Nonequilibrium phase transitions », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(2), 1992, pp. 403-421.
- ZANONE (P.G.), KELSO (J.A.S.) : « The coordination dynamics of learning and transfer: Collective and component levels », *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23, 1997, pp. 1454-1480.