

ZANONE, P. G. (1990). Perceptuo-motor development in the child and the adolescent : perceptuo-motor coordination. In C. A. Hauert (Ed.) *Developmental psychology. Cognitive, perceptuo-motor, and neuropsychological perspectives* (pp. 309-338). North Holland : Elsevier.

ZELAZO, N. A., ZELAZO, P. R., COTTEN, K. M. & ZELAZO, P. D. (1993). Specificity of practice effects on elementary neuromotor patterns. *Developmental Psychology*, 29, 686-691.

James Rivière (Ed.)
Le développement psychomoteur du jeune enfant
collection Psychomotricité
O solal éditeur - Marseille - 2000

2

La genèse des premiers pas Blandine BRIL

La posture debout et la marche bipède sont souvent présentées comme les premiers témoins de l'hominisation, tout comme les premiers pas sont culturellement perçus comme la sortie de la toute petite enfance, et l'entrée dans la vie sociale. Dans de nombreuses cultures l'acquisition de la marche autonome autorise la fin de l'allaitement, l'arrêt de la gymnastique néonatale, la nécessaire maîtrise de la propreté, ou encore la fin du portage au dos (Jo, 1989; Bril, Zack, Hombessa-Nkounkou, 1989).

L'enfant est ainsi considéré comme prêt à se lâcher et à "partir à la conquête du monde". Ces attitudes culturelles face au petit enfant, recourent d'une certaine manière, les résultats de travaux sur le développement. De nombreux auteurs insistent en effet sur l'importance de l'expérience locomotrice de l'enfant dans le développement affectif et cognitif. La mobilité dont il peut enfin se prévaloir, l'invite à de nouvelles opportunités d'apprentissage. Ainsi par exemple, à âge égal, l'enfant capable de se déplacer seul, serait plus intéressé par l'activité sociale du monde qui l'entoure, plus sensible à la disponibilité maternelle, plus attiré par l'inconnu (Kermoian & Campos, 1988). En outre le fait de se déplacer seul permettrait le développement des capacités cognitives de l'enfant, et en particulier de la cognition spatiale (Bai & Bertenthal, 1992; Benson, 1990; cf Rivière, ce volume).

Mais pourquoi la progression vers la marche indépendante nécessite-t-elle une si longue période pour l'enfant humain, alors que dans de nombreuses espèces animales le petit est capable d'une activité locomotrice si ce n'est à la naissance, après quelques jours ou quelques semaines seulement ? Que lui manque-t-il pour pouvoir se redresser et se déplacer ? Dans un texte tout à fait moderne par certain côté, McGraw en 1932, discutait les relations possibles entre la marche automatique chez le nourrisson et sa filiation incertaine avec la marche autonome, en suggérant que l'incapacité de l'enfant à marcher à la naissance, est due plutôt à une capacité d'équilibre non développée qu'à l'absence de mécanismes de marche.

Un mécanisme primitif et rudimentaire est présent, mais ■ apparaît segmenté et non intégré aux fonctions essentielles à l'ambulation verticale.

Pour pouvoir marcher debout, tout individu doit pouvoir supporter son poids, maintenir son équilibre et se propulser vers l'avant. (...) la tâche importante à laquelle l'enfant doit faire face consiste à développer un contrôle des forces gravitaires. Le plupart des nouveau-nés n'offre décidément qu'une réponse impuissante aux forces gravitaires. (...) (McGraw, 1932, p. 292).

Bien que soulignant, comme nombre de ses contemporains, le rôle déterminant de la maturation du système nerveux dans la mise en place de la marche bipède, McGraw reconnaissait, dans le processus qui mène à la marche autonome, une place importante à l'apprentissage :

Alors que l'acquisition de la capacité à marcher debout dépend d'un certain degré de maturation ou de "mûrissement" du système nerveux, ses éléments essentiels n'en sont néanmoins impliqués dans un processus d'apprentissage. (McGraw, 1932, p. 296).

Nous reviendrons sur cette question à différentes reprises dans ce chapitre.

Le développement des activités motrices dites phylogénétiques, dont la marche, a souvent été décrit comme relevant d'un principe de développement céphalo-caudal et proximo-distal (Gesell, 1946) s'appuyant sur un accroissement du contrôle du tonus musculaire et de la coordination des mouvements et sous-tendu par la maturation du système nerveux. De là découlerait la séquence bien connue d'étapes de développement posturo-moteur - maintien de la tête, position assise, position debout, marche - pour ne citer que les principales. Dans cette optique, l'acquisition de la marche autonome par l'enfant est souvent considérée comme étant essentiellement déterminée par la maturation du système nerveux. Dans leur ouvrage "Naître Humain", Dupoux et Melher (1990) admettent que le bébé marche quand il doit marcher, parle quand il doit parler, comme si une "horloge biologique" fixait à quel moment chacune de ces aptitudes doit se mettre en place. Bien entendu, l'environnement joue un rôle actif indispensable : il peut réguler, déclencher et sélectionner tel ou tel mécanisme existant. Mais en aucun cas, le milieu ne peut modifier ce qui a été défini par le programme génétique de l'organisme. L'enfant acquiert sans la moindre difficulté certaines aptitudes comme le langage ou la marche ... (p. 57).

Cette perspective est aussi celle de Forssberg (1985, 1992) pour qui la transformation graduelle d'une marche digitigrade du nouveau-né en une marche plantigrade de type adulte implique un processus graduel similaire du système nerveux (1985 : p.490).

La question qui se pose alors est la suivante : comment des modifications au niveau des structures nerveuses peuvent-elles expliquer les modifications comportementales observables dans le processus d'acquisition de la marche. L'idée qui sous-tend l'approche proposée ici est que, si la maturation physiologique et neurologique constitue à tout moment du développement des conditions nécessaires à l'acquisition des habiletés motrices, si elles sont à l'origine des contraintes à partir desquelles vont se mettre en place tout un ensemble d'habiletés, ce ne sont pas des conditions suffisantes. Chypothèse de travail proposée ici est que le processus d'acquisition de la marche est un processus d'apprentissage qui s'appuie sur les caractéristiques de l'organisme issues de la maturation neurophysiologique et du développement en général.

Les grandes étapes du développement locomoteur

De nombreux contemporains de McGraw ont réalisé dans les années 1930 d'admirables études longitudinales, décrivant dans les détails les nombreuses étapes conduisant progressivement l'enfant vers la marche bipède. Ces travaux établissent en quelque sorte des catalogues de descriptions souvent très détaillées des étapes qui, des premières ébauches d'un contrôle maladroit de la tête, va conduire l'enfant vers la marche autonome. Gesell & Ames (1940) par exemple, identifient 22 étapes dans le développement du ramper et de la marche à quatre pattes : commençant lorsque l'enfant, couché sur le ventre parvient à relever la tête quelques instants, passant par les différentes étapes de ramper ventre à terre, puis de marche à quatre pattes.

Pour donner une idée de l'importance du travail que représentaient ces études longitudinales dans les années 1930-1940, et en rappelant si besoin était que les moyens d'enregistrement qui nous sont maintenant si familiers n'existaient pas, je présenterai rapidement l'étude de Shirley (1931) dont bien des aspects restent précieux aujourd'hui. En collaboration avec Boyd, Shirley a suivi sur deux années entières, un groupe de 25 enfants, les observant chez eux, une fois par semaine durant la première année, puis une fois toutes les deux semaines. L'enregistrement de l'activité de marche était basée sur une méthode peut-être rudimentaire, mais simple et efficace, et qui est encore pratiquée actuellement, à peine modifiée, par différentes équipes (!). Cette méthode consistait à faire marcher l'enfant sur une longue feuille de papier kraft après lui avoir au préalable enduit le pied d'huile d'olive, ou de talc, afin de laisser une trace sur le papier, trace à partir de laquelle différentes mesures pouvaient être effectuées. A la fin de son étude l'auteur disposait ainsi de 743 séquences de pas, qui lui permirent d'être la première à quantifier le développement des paramètres globaux habituellement retenus dans les études sur la marche, tels que l'écartement des pieds, la longueur des pas, l'orientation du pied vers l'extérieur (out-toeing), ainsi que la fréquence des pas. Précurseur en son temps, elle s'intéressa aux différences interindividuelles, alors que ce n'est que récemment que l'accent a été mis sur l'importance, dans la compréhension des phénomènes de développement, des variations individuelles.

En dehors de quelques études longitudinales, de nombreuses études transversales ont conduit à l'établissement d'échelles de développement. L'objectif de ces échelles est essentiellement d'établir une "norme" en terme d'âge de développement, au service le plus souvent d'évaluations cliniques pour le suivi habituel de l'enfant. Sans vouloir en faire une liste exhaustive on peut citer le test de Bayley (1969) sans doute un des plus utilisés, l'échelle de développement de Brunet & Lézine (1951), l'échelle de développement de Denver (Frankenburg et Dodds, 1967), le test de Gesell et Amatruda (1947).

La figure 1 donne un résumé, à partir des échelles de Bayley (1969) et de Denver (1967), des âges auxquelles sont acquises certaines capacités motrices qui sont communément admises comme étant impliquées dans la progression vers la locomotion.

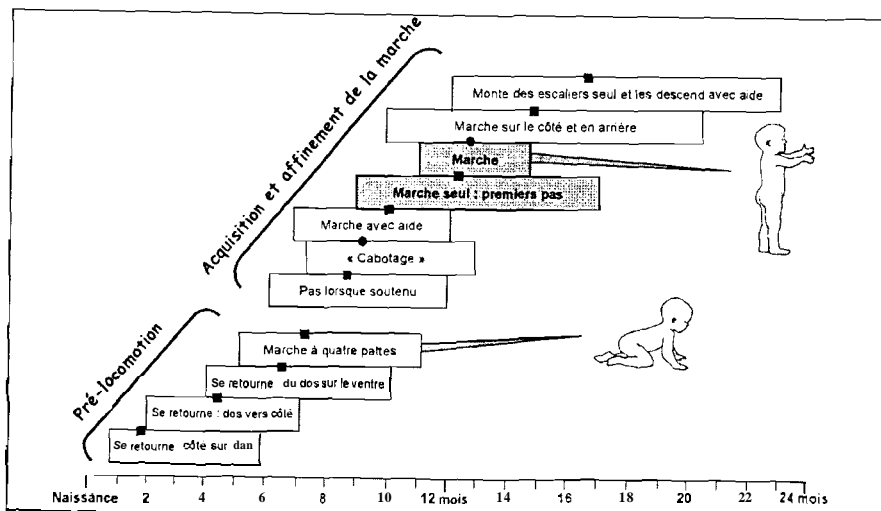


Figure 1.: Changements observables, dans la progression locomotrice vers la marche indépendante (Adapté de Keogh & Sugden, *Movement Skill Development*, p. 38) Les rectangles dont le côté supérieur porte un petit carré correspondent à l'échelle de Bayley. Le petit carré donne l'âge auquel 50% des enfants maîtrise une habileté locomotrice particulière, la base du rectangle représente la fourchette normale des âges d'acquisition, et représente 90% des enfants. La borne inférieure correspond à l'âge auquel 5% des enfants ont acquis la marche, la borne supérieure, 95%. Les rectangles dont le côté supérieur porte un cercle correspondent à l'âge auquel 50% des enfants ont acquis un certain niveau de développement dans l'échelle de Denver. Les valeurs d'âge associées à la longueur du rectangle correspondent aux âges où 65% des enfants ont acquis le niveau de développement indiqué (l'âge inférieur donne l'âge auquel 25% des enfants ont acquis ce niveau, la borne supérieure à 90%).

Si l'on considère plus précisément les étapes dans les modes de locomotion du jeune enfant, on constate qu'ils prennent appui sur des postures de plus en plus redressées : ramper ventre au sol, marche à quatre pattes, mains et genoux, puis éventuellement mains et pieds, enfin "cabotage" (marche sur le côté "en crabe" avec appui sur tout support), marche tenue, puis enfin marche indépendante. Il faut noter cependant que chacune de ces étapes n'apparaît pas nécessairement chez chaque enfant.

La majeure partie des travaux n'explique cependant pas cette progression que l'on retrouve plus ou moins chez la majorité des enfants, ni la fenêtre temporelle très importante de l'âge "normal" de l'acquisition de la marche qui peut varier de 10 à 18 mois, ni le fait que certains enfants, au demeurant tout à fait normaux, ne marcheront jamais à quatre pattes, ou que d'autres, élevés dans des cultures non occidentales, offriront un développement beaucoup plus précoce (Geber, 1973).

¹ Cette expression est empruntée à l'ouvrage de Koupernik et Dailly (1980), p. 144.

Une étude récente de Adolph et al. (1998) sur le développement de la marche à quatre pattes tente, à partir d'un suivi longitudinal de 28 enfants, d'évaluer la "filiation" pouvant exister entre différents modes de ramper, ainsi que le transfert possible de l'habileté acquise dans un mode de ramper à un autre. Si dans ce groupe d'enfants, tous sauf un, ont pratiqué une forme de marche à quatre pattes, 13 parmi les 28, c'est à dire près de la moitié, n'ont jamais ramper. Parmi les 15 autres la moitié a pratiqué ramper et marche à quatre pattes simultanément, alors que pour les autres la marche à quatre pattes est venue remplacer le ramper. Dans tous les cas, qu'il s'agisse du ramper ou de la marche à quatre pattes, les performances de l'enfant en termes de vitesse de progression, fréquence de pas, durée d'appui et d'oscillation des membres se sont améliorées avec l'expérience, ce qui suggère pour chaque stratégie locomotrice, la présence d'un certain apprentissage. Par ailleurs la pratique du ramper procure un avantage en ce qui concerne l'efficacité de la locomotion à quatre pattes.

Les enfants ayant pratiqué le ramper, offrent dès la première semaine de marche à quatre pattes une vitesse de déplacement plus importante que les autres, suggérant ainsi l'existence d'un transfert d'une expérience locomotrice à une autre, cet avantage disparaissant après plusieurs semaines. Cependant, ce phénomène n'apparaît pas lors du passage à la locomotion bipède, les enfants n'ayant pas ramper commençant à marcher un peu plus tôt que les autres. Si l'effet bénéfique de certaines expériences semble réel dans certains cas, il n'est pas général. La question qui reste ainsi en suspend à trait à la notion même d'expérience, ainsi qu'à celle du transfert d'une habileté à une autre. Nous discuterons à nouveau cette question à la fin du chapitre.

Considérer le développement locomoteur comme issu d'une programmation génétiquement déterminée, impliquant l'existence de "programmes" innés, empêche d'une certaine manière de s'intéresser au mode de construction de ces habiletés motrices, aux variations interindividuelles, ou bien même de s'attarder sur les processus du passage d'une activité locomotrice à une autre.

Pourquoi ne pas considérer, comme le suggérait McGraw (1932) et comme il est courant de le faire pour d'autres activités motrices, que la marche, de même que d'autres formes de locomotion - i.e.; course, saut à cloche pied, etc.- s'acquière, à l'issue d'un processus d'apprentissage, qui nécessite, comme tout apprentissage, une expérience diversifiée et la répétition inlassable de cette nouvelle activité.

Il me semble important de rappeler ici que toute étude sur le développement poursuit un triple questionnement : quoi, comment et pourquoi ? Les études auxquelles il a été fait allusion ici ont généralement admirablement répondu aux deux premières questions, décrivant dans les détails les objets du changement, et la manière dont ils se modifient, mais laissant généralement en suspend la question essentielle du "pourquoi".

Cette question est bien sûr la plus difficile puisqu'elle fait implique une recherche des causes des changements observés. En nous centrant sur l'acquisition de la

marche autonome, des premiers pas à la marche "adulte" c'est à cette question que sera consacrée la suite de ce chapitre, qui tentera d'y apporter quelques éléments de réponse.

Avant de présenter les résultats essentiels de nos travaux sur l'acquisition de la marche, il est nécessaire de se doter d'un cadre d'analyse de l'action motrice qui permette de rendre compte des changements comportementaux observés durant la période de mise en place de la marche, mais aussi des variations observables selon le contexte d'effectuation de l'action.

L'expression comportementale de l'action ?

D'une manière générale l'organisation de toute action, et donc les caractéristiques qualitatives observables du mouvement, peut être considérée comme la conséquence ou la résultante d'un certain nombre de contraintes liées aux spécificités de l'organisme, de l'environnement et de la tâche à effectuer (Newell, 1986). Ces contraintes, qui définissent les conditions limites de l'action, relèvent de trois ensembles principaux:

- 1) l'organisme, que l'on peut définir comme une personne ayant un certain potentiel de base issu du développement anatomique (taille, poids, masses musculaires et graisseuses, etc.), physiologique (maturation du système nerveux, des systèmes sensoriels,...), cognitif (perception, mémoire, connaissances, ...), affectif (motivation, peur, ...), etc.,
- 2) les propriétés de la tâche à réaliser ,
- 3) un environnement donné, incluant aussi bien les éléments matériels en jeu, en particulier les "outils", que le contexte physique, social ou affectif, dans lequel se déroule l'action.

Pour effectuer une action motrice telle que la marche, la course, le saut à cloche pied, ou toute autre activité impliquant la corps tout entier, de nombreux systèmes sont mobilisés. On peut en citer schématiquement quelques uns : le système postural permettant le maintien en posture érigée, les oscillateurs spinaux permettant une activité rythmique alternée des membres (Grillner, 1975), les systèmes sensoriels, visuel, labyrinthique et proprioceptif, le système musculaire dont l'activité permet le déplacement des segments corporels ainsi que les ajustements posturaux, le système physique en action, c'est à dire le corps dont les caractéristiques anthropométriques varient avec l'âge, le système cognitif qui va permettre le traitement des informations disponibles, etc. Ainsi toute activité motrice peut être considérée comme la résultante d'une activité intégrée de ces différents systèmes. Les caractéristiques de l'activité motrice vont donc dépendre du mode de fonctionnement de chacun des systèmes mobilisés, des conditions contextuelles de leur fonctionnement relativement aux propriétés de la tâche à effectuer (Fig. 2).

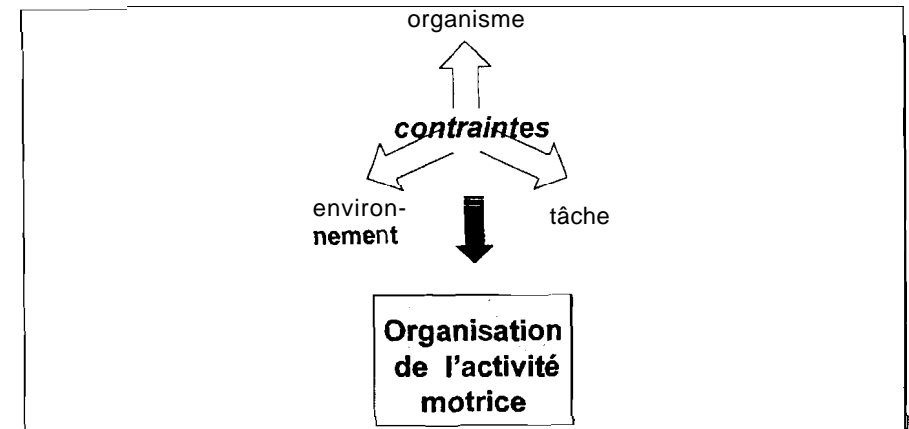


Figure 2 : Interaction entre les différents types de contraintes spécifiant certains aspects des coordinations motrices au cours de la réalisation d'une action. (D'après K. Newell (1986) *Constraints on the development of coordination*, p. 348)

D'une étape à l'autre, vers la marche indépendante

L'utilisation des notions de systèmes, de contraintes, de propriétés résultantes a été largement influencée par des résultats concernant les systèmes "dynamiques" de nature physique. Certaines propriétés de ces systèmes, en particulier ceux d'auto-organisation, ont été utilisées par l'approche écologique pour tenter de rendre compte des caractéristiques des coordinations motrices et de leur transformation au cours du développement de l'enfant et plus généralement de l'apprentissage d'habiletés motrices (voir par exemple les revues *Journal of Motor Behavior* de mars 1992, ou *Child Development* vol. 62 de 1993).

Les travaux d'Esther Thelen sont sans doute ceux qui montrent le plus clairement quel peut être l'apport de certains éléments de la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires dans les études sur le développement moteur (Thelen, 1986, Thelen & Smith, 1994; Thelen, Kelso & Fogel, 1987; Thelen & Ulrich, 1991). D'après Thelen (1986), les principes explicatifs seraient valables non seulement en temps réel (au niveau de l'effectuation du mouvement à un moment donné), mais aussi diachroniquement (au niveau des étapes de développement). Différents auteurs ont repris cette idée dans l'analyse du développement de compétences locomotrices (Clark et al., 1993; Vereijken & Thelen, 1997; Adolph, 1993)

Dans cette perspective, les propriétés d'organisation d'un tel système peuvent se résumer en trois points (Thelen, 1986: p. 109) :

- 1) La complexité observée d'un système, n'est pas due à une programmation a priori, mais est une propriété résultante des relations entre les éléments du système.

- 2) Quelle que soit l'échelle considérée, il existe des composants qui contrôlent la stabilité du système, et d'autres qui lui permettent flexibilité et adaptation.
- 3) Les transitions d'un état stable à un autre ne sont pas linéaires ou continues. Des changements au niveau de l'un des éléments du système engendrent des perturbations d'où peuvent résulter des comportements qualitativement différents.

Les caractéristiques d'un mouvement effectué seraient en fait la résultante de la dynamique des relations entre les éléments d'un système à un moment donné. Si l'on considère l'acquisition de compétences posturo-motrices, plusieurs remarques sont nécessaires. Les différents éléments constitutifs du système n'ont pas, a priori, un développement synchrone. Ainsi, même si certains éléments sont tout à fait fonctionnels, d'autres pourront avoir un effet inhibiteur ou bien limitatif. Le comportement observable à un moment donné du développement est donc le produit des interactions dynamiques, qui se situent à différents niveaux de relations, des éléments du système. De nouvelles formes de comportement seront observables lorsque le composant ayant un développement comparativement moins rapide parviendra à maturité.

Prenant l'exemple de la marche, Thelen identifie huit composants choisis à des fins heuristiques, et qui ne sont donc pas exclusifs de l'existence d'autres composants (Thelen, 1986: 120-24) : le générateur de rythme, la différenciation articulaire, le contrôle postural, la sensibilité au flux visuel, le tonus musculaire, la force des extenseurs, les contraintes corporelles, et la "Motivation".

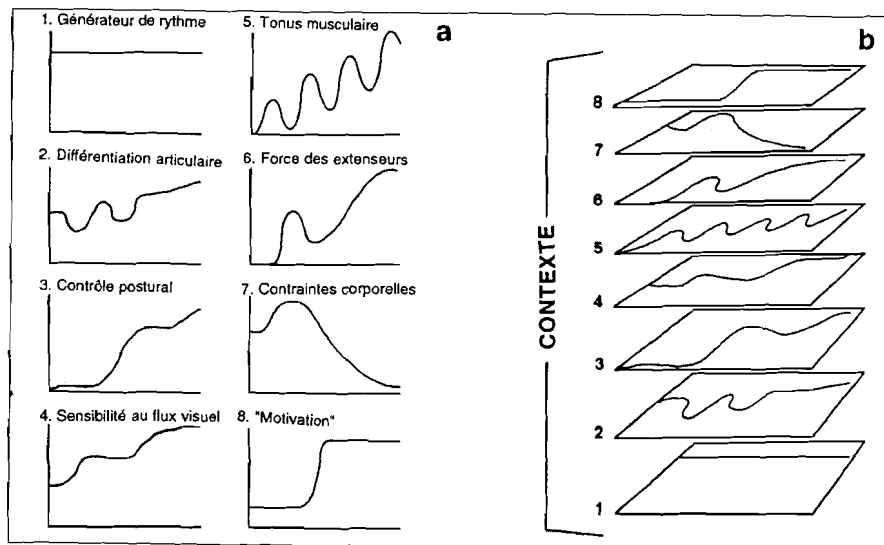


Fig 3 : Schématisation du développement la marche (hypothétique) en fonction de l'âge.
 a) Développement hypothétique des composants de la marche en fonction de l'âge.
 b) Résultante, à un moment donné et en fonction du contexte, de l'ensemble des composants.
 (D'après E. Thelen (1986) *Development of coordinated movement: Implication for early human development*).

Le générateur de rythme serait fonctionnel dès avant la naissance, alors que le contrôle postural nécessaire au début de la marche indépendante n'est présent que vers un an; de même la motivation à la marche peut aussi dépendre de différents facteurs. L'auteur développe l'idée qu'à tout moment du développement, les mouvements - ici ceux de la marche - sont le produit des composants du système, chacun ayant sa propre courbe de développement. Ces interactions entre composants se produisent dans un ensemble défini de contraintes et d'opportunités que permet le contexte.

Ainsi dans leurs travaux sur l'organisation des coordinations des mouvements pré-locomoteurs, Thelen et collaborateurs ont montré comment, à partir de manipulations des constantes biomécaniques (Thelen, Fisher & Ridley-Johnson, 1982) ou de manipulations du contexte de l'effectuation du mouvement (Thelen, 1986; Thelen & Ulrich, 1991), l'organisation des coordinations des mouvements des jambes pouvait être modifiée de manière tout à fait substantielle. C'est selon cette perspective que Thelen interprète la disparition du mouvement de marche automatique chez le bébé de quelques semaines, par le fait que, dans les premiers mois, les caractéristiques anthropométriques de l'enfant se modifient de manière très importante. L'augmentation de la masse adipeuse des membres inférieurs, sans augmentation parallèle de la force musculaire conduirait à la disparition de la marche automatique. Cargument principal de l'auteur est basé sur le fait que ces mouvements réapparaissent lorsque l'enfant est à demi immergé dans de l'eau. Le milieu aquatique diminue en effet la force musculaire nécessaire à l'effectuation de tels mouvements.

Une manipulation non plus du contexte mais des masses des membres inférieurs (Thelen & Fisher, 1983) conduit à formuler les mêmes conclusions.

On constate ici que chacun des "composants" pourrait être considéré à son tour comme un système composé d'éléments interagissant. Une telle approche a le mérite de montrer la nécessaire interaction d'un nombre important d'éléments, l'asynchronie de leur développement réciproque, l'impact des éléments des uns sur les autres, et de suggérer que tout comportement moteur est en fait la résultante d'un contrôle de nombreux mécanismes interagissant à divers niveaux.

Si les transformations spectaculaires de l'activité motrice de l'enfant dans sa première année dépendent bien évidemment de la maturation du système nerveux central, il est difficile dès lors que l'on considère les caractéristiques comportementales de l'activité locomotrice de tout jeune marcheur, de dégager une explication en terme de causalité. Comment en effet expliquer l'évolution très rapide des caractéristiques comportementales bien connues du mouvement locomoteur du jeune marcheur, vitesse de marche réduite, pas courts, écartement des pieds important, durée relative du double-appui nettement supérieure à celle observée chez l'adulte, posé du pied à plat, absence de contact par le talon, absence de balancement alterné des bras, etc. ? Prenons l'exemple de la myélinisation des fibres nerveuses souvent considérée comme un élément dont la contribution serait essentielle dans la mise en place de la motricité chez le bébé : il n'existe pas de travaux à notre

connaissance qui permettent d'imputer à la myélinisation l'évolution de certaines caractéristiques de la marche chez l'enfant (voir le dernier chapitre de Sutherland et al., 1988). Nous proposerons donc dans cet article une autre manière de poser le problème de l'acquisition d'une compétence motrice telle que la marche, en partant des propriétés de la tâche à effectuer, et en considérant que pour marcher l'enfant doit résoudre un problème moteur nouveau avec les capacités dont il dispose à cette période de sa vie.

Ainsi en partant des propriétés fonctionnelles de la marche, c'est à dire des propriétés mécaniques que le système, constitué par le corps et son support, doit satisfaire afin de se déplacer dans le plan antéro-postérieur grâce à une succession d'appuis unipodaux et bipodaux, nous montrerons que l'évolution des caractéristiques de la marche de l'enfant peut être interprétée comme la progressive construction d'une solution motrice résultant de l'ensemble des contraintes liées à l'enfant, à la tâche et à l'environnement (voir figure 2).

Qu'est-ce que marcher ?

Comme nous venons de le voir, un des modes de locomotion humaine consiste à marcher, c'est à dire à déplacer son corps selon un axe antéro-postérieur, grâce à une succession de simple-appuis (appui unipodal), et de double-appuis (appui bipodal) (voir figure 4). Ce déplacement, qui sera considéré d'un point de vue fonctionnel comme la caractéristique essentielle de la tâche locomotrice, ne sera possible que grâce à la création de forces propulsives. Brenière et coll. (1987) ont montré que ces forces étaient générées par la création et la modulation d'une distance entre le centre des pressions (qui est le barycentre des forces réactives au sol) et la projection au sol du centre de gravité du sujet. Cette activité conduit à une situation de déséquilibre, puisque le centre des pressions et le centre de gravité du corps ne se trouve à peu près jamais sur la même verticale². (voir figure 5).

Cependant, la distance qui sépare ces deux points - centre des pressions et projection au sol du centre de gravité - peut être plus ou moins grande au cours d'un cycle, c'est à dire entre deux contacts au sol du même pied³. En outre la projection du centre de gravité peut se faire hors de la base de sustentation, c'est à dire de la

² Définition de l'équilibre : Pour qu'un corps rigide reposant sur un plan horizontal soit en équilibre deux conditions doivent être réunies :

- La résultante des forces externes - réaction R du plan et forces gravitaires, mg poids du corps - doit être égale à zéro;
- La somme des moments de ces forces relativement à G (centre de gravité), doit être nulle.

Une conséquence de ces deux conditions est une distance nulle entre le barycentre des forces réactives (centre des pressions) et la projection au sol du centre de gravité. En outre, si la projection du centre de gravité se trouve à l'intérieur de la surface d'appui (délimitée par le contour des deux pieds), alors l'équilibre peut être rétabli, il n'en est plus de même si le centre de gravité se projette à l'extérieur de cette surface, situation qui entraîne alors une chute de l'objet considéré (voir figure 5).

³ Nous considérons ici qu'un cycle est constitué de deux pas, un pas correspondant à toute activité se déroulant entre le contact au sol d'un pied et le contact suivant. c'est à dire celui du pied controlatéral. (voir figure 4).

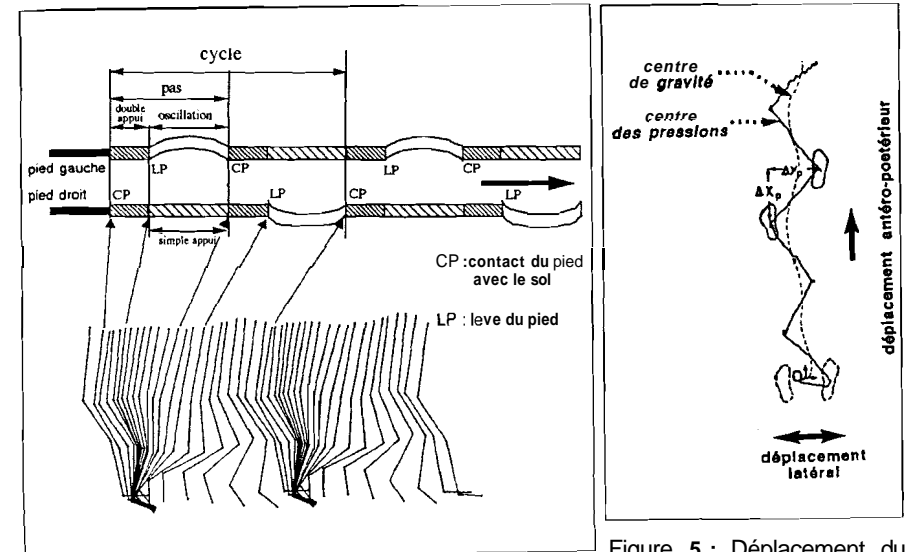


Figure 4. : Représentation schématique de la marche.

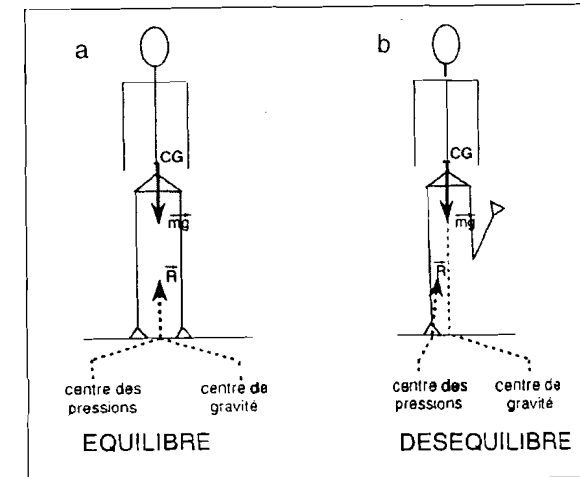


Figure 6. :
a) Condition d'équilibre de l'appui bipodal: le centre des pressions et le centre de gravité sont situés sur la même verticale;
b) Condition de déséquilibre de l'appui unipodal : existence d'une distance non nulle entre le centre des pressions et la projection au sol du centre de gravité.

Figure 5.: Déplacement du centre des pressions et de la projection au sol du centre de gravité au cours d'une séquence de pas pour un enfant ayant quelques semaines de marche. ΔX_p : mesure de la longueur du pas; ΔY_p : mesure de l'écartement des pieds au cours d'un pas.

base d'appui délimitée par les deux pieds. Durant la phase d'appui unipodal la projection du centre de gravité se trouve être hors de la base de sustentation (fig. 6), conduisant à un déséquilibre maximal. On comprend ainsi mieux l'importance d'une activité posturale constante nécessaire pour contrebalancer l'instabilité liée à l'activité même de la marche, et éviter ainsi une perte d'équilibre conduisant éventuellement à une chute.

Une telle approche met l'accent sur l'activité globale du marcheur, résultant de l'action simultanée des deux hémicorps, alors que le caractère symétrique du mouvement de marche a conduit de nombreux auteurs à étudier la marche en se focalisant sur l'un des hémicorps. Il nous est apparu essentiel dans nos travaux de considérer les caractéristiques globales du corps en mouvement, et non pas seulement d'un hémicorps, afin de montrer l'importance, dans le processus d'acquisition de la marche, de la maîtrise, par le jeune marcheur des propriétés de la tâche en jeu⁴. Nous formulons ainsi l'hypothèse que l'apprentissage de la marche consiste pour l'enfant à tenter de résoudre de manière optimale le dilemme qui s'offre à lui : produire et maîtriser ce déséquilibre qui seul permet la production de forces propulsives qui à leur tour engendreront un déplacement vers l'avant.

De nombreux auteurs considèrent qu'un manque de contrôle postural empêche la marche indépendante, alors que la plupart des composants qui y contribuent sont fonctionnels bien avant cet âge (Thelen, 1986; Thelen et al., 1989). Le ou les éléments qui permettrai(en)t à l'enfant de faire ses premiers pas restent méconnus. Il se pourrait que la marche bipède requiert un certain développement anatomique du corps de l'enfant : Thelen (1983) a répertorié quelques études suggérant que les enfants ayant des jambes courtes et épaisses marchent plus tard que ceux dont les jambes sont plus longues et plus minces. Il n'en reste pas moins que les débuts de la marche représentent en fait une expérience totalement nouvelle pour l'enfant : il lui faudra être capable de produire et de contrôler une succession de déséquilibres unipodaux et bipodaux nécessaires à une progression dans le plan antéro-postérieur.

Or à cette époque l'enfant n'a pas l'expérience d'un équilibre unipodal, qu'il est d'ailleurs incapable de maîtriser. Ce n'est que beaucoup plus tard qu'il pourra se maintenir de manière stable sur un seul pied⁵. Apprendre à marcher peut ainsi être décrit comme le processus d'intégration de nécessités posturales (stabiliser le corps de manière à éviter une perte d'équilibre et donc une chute) et de nécessités dynamiques (créer les conditions dynamiques permettant de déplacer le corps vers l'avant), apprendre aussi à intégrer, c'est à dire à interpréter et à utiliser les informations sensorielles disponibles. Nous essaierons de montrer dans la suite de ce

⁴ Les travaux rapportés ici ont été réalisés en collaboration avec Yvon Brenière et avec Annick Ledebt au Laboratoire de Physiologie du Mouvement de l'université d'Orsay, puis plus récemment dans le cadre d'une toute jeune Association "Pour l'Étude du développement de la posture et de la locomotion chez l'enfant" hébergée par l'Hôpital Pédiatrique Robert Debré à Paris.

⁵ En effet d'après Bayley (1969) ce n'est qu'à 30 mois que l'enfant est capable de tenir sur un pied 1 seconde, 5 secondes à 38 mois. donc dans les deux cas bien après les débuts de la marche autonome.

texte la complexité de ce que nous considérons comme un véritable apprentissage qui nécessite plusieurs années avant de parvenir à un contrôle posturo-moteur de type adulte. Nous ne traiterons ici que l'aspect "purement moteur" de l'acquisition de la marche, renvoyant le lecteur à d'autres publications en ce qui concerne le rôle des informations sensorielles dans le contrôle de la locomotion (Bril et Ledebt, 1998 ; Lebept, 1997)

Acquisition des coordinations motrices en jeu dans la marche

Si les délais nécessaires à l'acquisition de la marche les plus couramment avancés sont en général de 2 à 3 ans de marche autonome, il existe un désaccord réel sur l'âge d'acquisition d'une marche ayant les caractéristiques de la marche mature. Très précoce pour certains, Clark et collaborateurs (Clark & Phillips, 1987) soutiennent que la marche mature serait acquise dès trois mois de marche indépendante, alors que pour Okamoto & Kumamoto (1972) ou Cavagna et al. (1983) il faut à l'enfant cinq à six ans de marche autonome pour parvenir à une marche ayant les mêmes caractéristiques que la marche adulte. En fait le choix des paramètres étudiés, en grande partie dicté par les méthodologies d'enregistrement utilisées, et l'idée implicite que ces paramètres constituent de bons indices du processus de développement de la marche expliquent, en partie au moins, ces divergences.

Comme nous l'avons déjà souligné, pour de nombreux auteurs, les caractéristiques de la marche du jeune enfant relèvent d'un manque de contrôle postural qui impose en quelque sorte les spécificités du mouvement au début de la période de marche autonome, indépendamment des contraintes d'ordre morphologique (taille de l'enfant, longueur de la jambe, du pied) : une personne plus grande pourra faire des pas plus longs sans pour autant que les processus de contrôle de la marche soit différents de ceux utilisés par des personnes plus petites de taille. Ainsi l'instabilité posturale conduirait l'enfant à avoir une durée du double-appui (relativement à la durée totale du mouvement) nettement plus importante que chez l'adulte (Sutherland et al., 1988), une base de sustentation, toujours relativement à la taille de l'enfant, beaucoup plus grande (Shirley, 1931; Burnett & Johnson, 1971), caractérisée souvent par une position des pieds tournés vers l'extérieur. L'activité musculaire fait apparaître des co-contractions qui, en augmentant la rigidité du corps aideraient le contrôle de l'équilibre (Okamoto & Kumamoto, 1972).

L'ouvrage de Sutherland et collaborateurs intitulé *The Development of Mature Walking* (1988) donne une image très complète, des valeurs moyennes de nombreux paramètres de la marche depuis l'âge d'un an jusqu'à 7 ans, et de leurs évolutions sur cette période. La plupart de ces études cependant semblent considérer la période d'acquisition de la marche comme une période relativement homogène. Or nos propres travaux suggèrent que le développement de la marche autonome relève d'un processus caractéristique non linéaire. Bien que basée sur un nombre restreint de sujets, c'est grâce à une étude longitudinale de cinq enfants sur cinq années, que nous avons pu analyser certains aspects du processus de mise en place de la marche indépendante (Bril & Brenière, 1992). Tout en confirmant le plus

souvent les données de la littérature, nous avons pu travailler de manière détaillée sur l'évolution de la marche dans les mois qui suivent les premiers pas, et ainsi mettre en évidence différentes phases d'acquisition, alors que la majorité des travaux sur l'acquisition de la marche sont basés sur les données de groupes transversaux d'enfants de différents âges, ce qui masque d'importantes modifications, sur de courtes périodes, de certaines caractéristiques de la marche du jeune enfant.

Évolution des paramètres globaux de la marche

Les études dont il est question ici sont basées sur une approche globale de la marche, qui nous a amenés à nous centrer sur l'évolution des valeurs des paramètres qui représentent en quelque sorte un résumé des caractéristiques locales du mouvement locomoteur. Nous avons étudié en particulier la vitesse, la fréquence, la longueur de pas, l'écartement des pieds, la durée du double-appui, l'accélération latérale et verticale du centre de gravité. La caractéristique essentielle de l'évolution de ces différents paramètres est leur développement non linéaire (voir figure 7). Prenons la vitesse moyenne de progression : très faible lors des premiers pas, de 0,2 à 0,4 m/s (ce qui donnerait une vitesse de marche de 0,75 à 1,5 km/h alors qu'un adulte marche à une vitesse moyenne de 5 à 6 km/h), elle augmente de manière très significative durant, les 3 à 6 premiers mois de marche indépendamment selon l'enfant, pour se stabiliser par la suite autour de 1m/s en moyenne. Parallèlement, la fourchette de vitesses utilisées par l'enfant lors d'une séance d'observation, s'accroît elle aussi de manière importante. Nous avons donc considéré dans notre interprétation que celle-ci était le témoin relativement fidèle de ce que l'enfant est capable de faire à un moment donné. Une fourchette de vitesse faible est donc interprétée comme l'incapacité de l'enfant à faire varier sa vitesse de progression, alors qu'une fourchette de valeurs plus importante témoigne de sa capacité à la moduler volontairement. Les autres paramètres offrent de même une courbe de développement analogue, forte durant ces 3 à 6 mois, puis nettement plus progressive. La longueur de pas passe d'une quinzaine de centimètres à une cinquantaine, parallèlement l'écartement diminue de moitié durant cette période, la durée relative du double-appui⁶ se stabilisera entre 25 et 30% de la durée du pas, la fréquence de pas qui montre une augmentation faible mais significative durant les premiers mois commence à diminuer régulièrement durant la période où se stabilisent les autres paramètres. Cette tendance caractéristique ne peut être expliquée par la croissance de l'enfant. En effet des résultats en valeurs relatives (longueur des pas rapportée à la taille de l'enfant ou à la longueur de la jambe) accentuent encore cette caractéristique de la trajectoire développementale observée. C'est donc en terme de changement de stratégie de marche que l'on raisonnera.

⁶ Durée relative du double-appui = durée du double-appui / durée du pas. Cette durée relative du double appui correspond chez l'adulte à 20% en moyenne de la durée totale du pas.

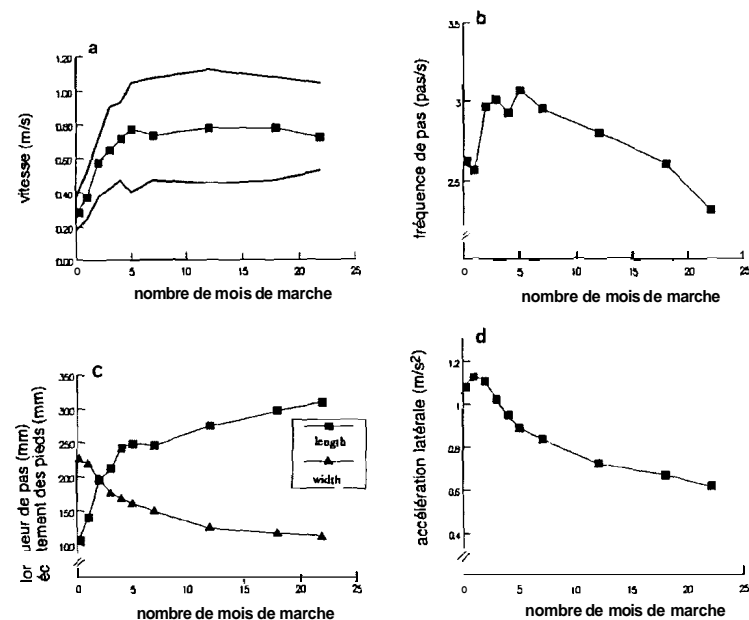


Figure 7.: Évolution des paramètres de la marche: données moyennes pour le groupe de 5 enfants (chaque point représente la valeur moyenne du paramètre à un âge donné, calculée à partir d'une quarantaine de séquences de pas, chaque séquence étant composée de 3 à 5 pas selon l'âge de l'enfant) (Adapté de Bril et Brenière (1992) *Journal of Motor Behavior*, p. 109).

Nous avons vu à partir de l'analyse des caractéristiques de la tâche que l'un des problèmes essentiels et nouveau pour l'enfant tient à son incapacité à maîtriser la situation de déséquilibre caractéristique de la marche. Une manière de mesurer la capacité à gérer la succession d'états d'équilibre et de déséquilibre au cours du pas consiste à étudier les valeurs de l'accélération verticale du centre de gravité du marcheur durant le cycle (Brenière & Bril, 1988, 1998). Directement déduite des mesures des forces réactives au sol⁷, l'accélération verticale rend compte des phases de chute et de rattrapage de l'équilibre : une accélération positive résulte d'une activité de propulsion, alors qu'une valeur négative témoigne d'une situation de chute dynamique. L'accélération verticale est donc interprétée comme un indicateur de l'activité antigravitaire, c'est à dire de la capacité à maintenir la position du centre de gravité à un niveau qui oscille de manière périodique autour d'une constante, au cours d'une succession de pas. Ce paramètre renseigne donc sur la stratégie de maintien à hauteur du centre de gravité au cours de la marche.

⁷ L'accélération verticale du centre de gravité est donnée par la formule : $ZG = \Delta Rz/m$ avec ($\Delta Rz = Rz - mg$, ou m et mg représentent respectivement la masse et le poids du sujet)

Nous avons par ailleurs décrit la phase d'appui unipodal comme une période de déséquilibre intense, maximal au moment qui précède immédiatement le contact du pied au sol (voir figure 8 a). Nous avons donc mesuré la valeur de l'accélération verticale à cet instant de déséquilibre maximal (Brenière et Bril, 1998). Alors que chez l'adulte cette valeur est toujours positive, ce qui veut dire que le centre de gravité est impulsé verticalement, chez l'enfant la valeur de l'accélération verticale à la fin du simple appui est toujours négative, traduisant une situation dynamique de chute. Plus intéressant encore, et comme le montre la figure 8 b, les valeurs moyennes de l'accélération verticale à ce moment de déséquilibre maximal offrent une courbe de développement caractéristique : augmentant de manière importante en valeur négative jusque vers 4-6 mois de marche indépendante, la tendance s'inverse à partir de cette période. Il faudra encore plusieurs années, plus de trois ans, pour que cette valeur devienne positive. Par ailleurs, le calcul des corrélations entre les valeurs de l'accélération et de la vitesse de marche pour chaque séance d'observation, montre une augmentation significative de la valeur de la corrélation durant toute la période pendant laquelle les valeurs de l'accélération verticale augmentent en valeurs négatives (figure 8 c). Cette valeur de la corrélation diminuera ensuite, pour devenir non significative après plus de deux ans de marche autonome c'est à dire vers 3 ans - 3 ans et demi.

Quelle interprétation donner à ce processus de développement. Durant les premiers mois de marche indépendante, le mouvement devient "efficace", il y a en particulier une augmentation sensible de la vitesse moyenne de progression, qui va de pair avec une augmentation de chute verticale. Or une augmentation de la vitesse implique une augmentation de la longueur du pas et/ou une augmentation de la fréquence de pas. Si la longueur de pas augmente, cela produit un déséquilibre plus important (voir figures 5 et 6, ainsi que 8 a) qui impliquerait pour le compenser une activité posturale de maintien du segment tête-tronc plus importante elle aussi, que l'enfant n'est pas en mesure de produire (Brenière et Bril, 1998). Ce résultat nous avait conduit à publier un article avec ce titre: "Pourquoi l'enfant marche en tombant, alors que l'adulte tombe en marchant ?" (Brenière & Bril, 1988). Il faudra ainsi à l'enfant plusieurs années pour parvenir non seulement à maîtriser le déséquilibre produit durant l'appui unipodal mais aussi à se propulser durant ce simple appui.

Nous faisons par ailleurs l'hypothèse que cette difficulté à mettre en place la maîtrise d'une activité antigravitaire durant le simple appui sera similaire dans des activités impliquant un appui unipodal tel que le passage d'obstacle ou la montée d'escalier⁸.

⁸ Une étude en cours sur le passage d'obstacle semble aller dans ce sens. L'enfant de 18 mois ne parvenant pas à passer un obstacle, même si ce dernier est d'une très petite hauteur (Bril & Drouard, manuscrit en préparation).

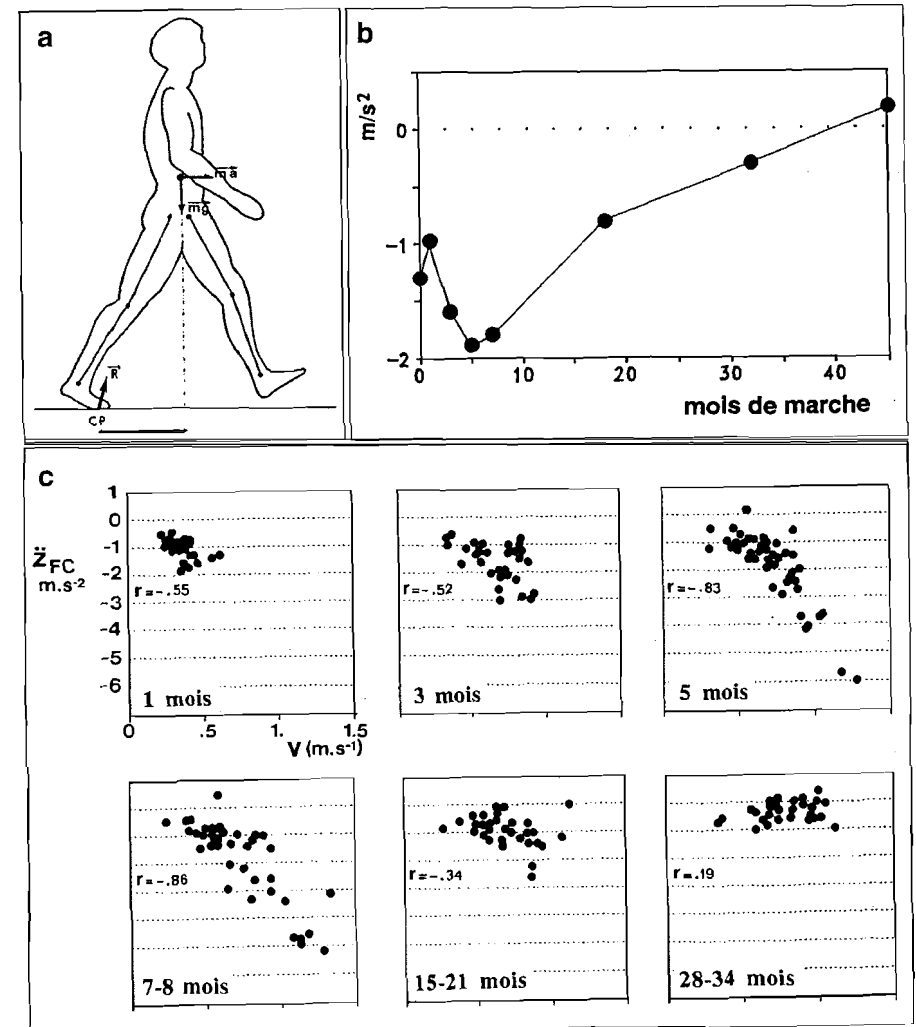


Figure 8 : Accélération verticale du centre de gravité:
a) Position du corps du marcheur à l'instant précédant le posé du pied au sol, instant de déséquilibre maximal (Croquis réalisé à partir de D.Winter, *The Biomechanics and motor control of human gait*, University of Waterloo Press, 1991).
b) Courbe de développement des valeurs moyennes de l'accélération verticale au moment du contact du pied (Adapté de Brenière et Bril (1998), *Experimental Brain Research*)
c) Covariation entre accélération verticale au moment du contact du pied, et vitesse de progression, en fonction de l'expérience de marche (Adapté de Brenière et Bril (1998), *Experimental Brain Research*).

Évolution des caractéristiques cinématiques du mouvement de marche : la nécessaire stabilisation du tronc et de la tête

Les données présentées jusqu'ici sont considérées comme des paramètres globaux, image résultante de l'ensemble des caractéristiques locales du mouvement. Ainsi par exemple, la cinématique du centre de gravité du corps du sujet, est la résultante de la cinématique de l'ensemble des segments corporels impliqués dans le mouvement. Ledebt et Brill (2000) ont étudié le mouvement de rotation de la tête et du tronc dans les plans latéral et sagittal sur un groupe de 7 enfants suivis longitudinalement durant plus d'une année à partir de leurs premiers pas⁹. La stabilité du tronc et de la tête dans une tâche telle que la marche est essentielle pour deux raisons principales.

La première à laquelle il est le plus souvent fait référence, concerne la nécessaire stabilité de la tête, dans la mise en place d'un référentiel visuel et vestibulaire. En effet, pour créer les conditions optimales pour l'acquisition et l'interprétation d'informations tant visuelles que vestibulaires, les organes récepteurs doivent être dans des conditions de stabilité maximale. Une seconde raison à une nécessaire stabilité de la tête et du tronc a trait au comportement inertiel du corps durant la marche. Le segment "tête et tronc" représente une proportion importante de la masse du corps, et un mouvement important de ce segment au cours de la marche, ou d'autres activi-

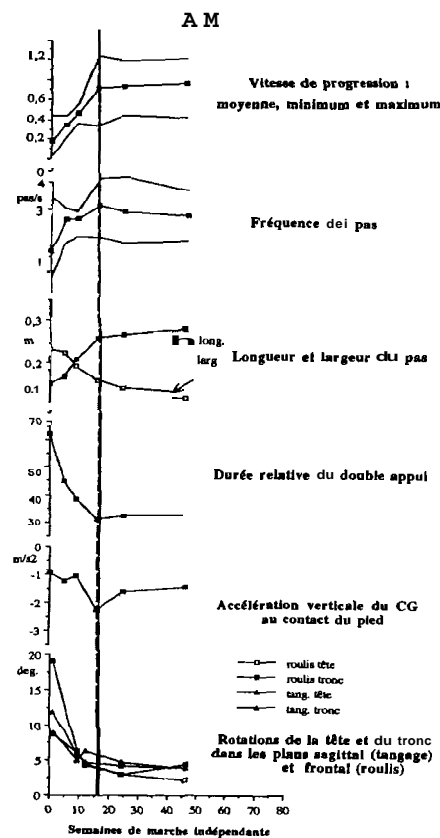


Figure 9 : Evolution des valeurs moyennes de rotation du tronc et de la tête dans les plans frontal et antéro-postérieur, ainsi que des paramètres globaux de la marche pour un enfant représentatif. (adapté de Ledebt et Brill, *Developmental Psychobiology*, 2000).

⁹ Cette importante étude longitudinale constituait l'objet central de la thèse d'Annick Ledebt "Aprendre à marcher : Développement des mouvements de la tête et du tronc au cours des deux premières années d'acquisition de la marche étudiée conjointement au développement des réponses vestibulo-oculaires", Université-Paris XI, 1996.

tés impliquant le corps dans sa totalité, amplifierait les situations de déséquilibre, dont on a vu qu'elle constitue le défi majeur au jeune marcheur.

La figure 9 donne pour un enfant représentatif les valeurs moyennes de la rotation du tronc et de la tête lors de la marche en fonction de l'expérience de marche, dans le plan frontal (mouvement de roulis) et dans le plan antéro-postérieur (mouvement de tangage). Ici encore, l'on constate une diminution importante des mouvements de roulis et de tangage durant les premiers mois d'acquisition de la marche, valeurs qui se stabilisent par la suite. C'est en outre dans le plan frontal que la tendance est la plus marquée.

Quel lien peut-on faire entre ces données sur la cinématique du tronc et de la tête, et celles sur des paramètres tels que la longueur des pas ou l'écartement des pieds. Prenons ce dernier paramètre. Nous avons vu que le tout jeune marcheur utilise une grande base de sustentation, avec un écartement des pieds important, et que cet écart diminue de manière significative durant les premiers mois de marche. Or, plus l'enfant marche avec les pieds écartés, plus le mouvement de balancier du haut du corps sera important. La figure 10, illustre cette relation entre écartement des pieds et mouvement du tronc.

Cependant, une autre interprétation est possible. L'enfant lors de ses premiers pas, peut avoir des difficultés à maîtriser le mouvement du segment tronc-tête par insuffisance de forces musculaires pour stabiliser le tronc, ce qui va ainsi augmenter l'instabilité et donc rendre nécessaire une large base de sustentation.

Ainsi le mouvement de la tête et du tronc peut être la conséquence mais aussi la cause d'une large base de sustentation. Inversement, la diminution d'amplitude des mouvements de roulis observés dans les quelques mois qui suivent les débuts de la marche autonome est dans une large mesure due au fait que l'enfant est maintenant capable de mieux contrôler son équilibre, mais dépend sans doute aussi d'une capacité plus grande de l'enfant à stabiliser le segment tête-tronc, permettant la diminution du

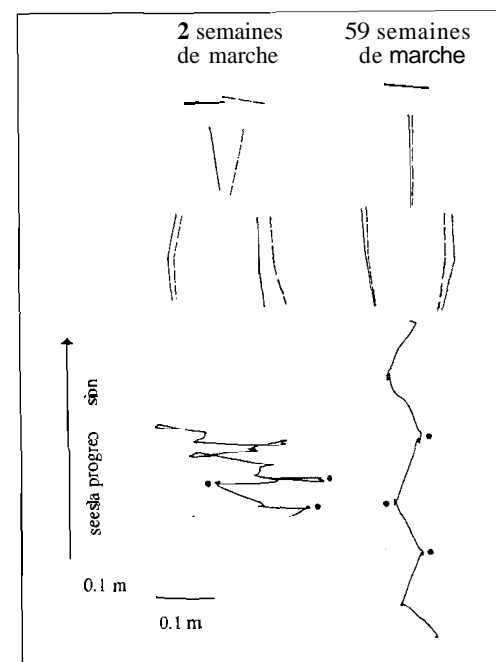


Figure 10.: Relation entre le mouvement de rotation latérale (roulis) de la tête et du tronc et l'écartement des pieds au cours d'une séquence de pas

déséquilibre et donc rendant caduque la nécessité d'une grande base de sustentation. Cet exemple montre clairement la multiplicité des composants et leurs effets réciproques résultant ou bien produisant les caractéristiques comportementales du mouvement.

L'acquisition de la marche, un processus en deux étapes

Une des caractéristiques les plus marquantes du développement des paramètres analysés dans les études longitudinales présentées est propre à leur évolution non linéaire, ce qui nous a conduit à faire l'hypothèse de l'existence de deux phases principales d'acquisition de la maîtrise posturo-locomotrice (Bril & Brenière, 1992).

La première phase, que nous interprétons comme une phase *d'intégration* de la posture et du mouvement, d'une durée de 3 à 5 mois selon les enfants, est caractérisée comme nous l'avons vu par une évolution très rapide des paramètres de la marche (voir figures 7 à 9). L'augmentation de la vitesse moyenne de progression qui passe de 0,20 m/s à 0,80 m/s, de la longueur du pas ainsi que de la fourchette de vitesses utilisées montre que la marche devient véritablement fonctionnelle. Par ailleurs on note une forte diminution de l'écartement des pieds ainsi que de la durée relative du double-appui, paramètres généralement considérés comme indexant les aspects posturaux de la marche. On observe simultanément la mise en place d'une corrélation significative entre fréquence de pas et vitesse comme c'est le cas chez l'adulte.

On peut donc faire l'hypothèse que durant cette phase d'acquisition, l'enfant "apprend à utiliser" les contraintes mécaniques du système composé de son corps, du sol sur lequel il marche et de la gravité (Brenière, Bril et Fontaine, 1989), en d'autres termes cette période est dévolue à l'intégration des contraintes posturales aux nécessités dynamiques de la marche.

Cette hypothèse d'une nécessaire intégration par le tout jeune marcheur, des composantes biomécaniques de son corps est corroborée par l'étude de l'évolution de la durée du premier pas au cours des six premiers mois de marche autonome. Chez l'adulte, comme chez l'enfant de plus de 4 ans, Brenière et collaborateurs (Brenière et al., 1986; Ledebt & Brenière, 1994) ont montré que la durée du premier pas d'une séquence de pas était constante pour une personne donnée et que par ailleurs une très bonne approximation de cette durée est donnée par la demi-période d'un pendule composé inverse. L'intérêt de ce modèle est qu'il est une fonction des caractéristiques de masse, de taille et de moment d'inertie du corps du sujet¹⁰. Appliquée à l'enfant qui fait ses premiers pas, cette modélisation n'était pas satisfaisante, les durées observées du premier pas étant plus faible que celle données

¹⁰ La demi-période d'un pendule composé inverse est donnée par la formule :

$$T/2 = \pi \left((IG + mh^2) / mgh \right)^{1/2}$$

m = masse du corps; g = forces gravitaires; h = distance au sol du centre de gravité; IG = moment d'inertie.

par une modélisation basée sur un pendule inverse composé. Cependant une modélisation basée sur une situation plus simple, un pendule inverse simple, donnait des résultats correspondant parfaitement à ce qui se passait chez le tout jeune marcheur. Or la période d'un pendule simple ne dépend que d'une caractéristique du pendule - la distance au sol de son centre de gravité¹¹. Ces résultats peuvent être résumés de la manière suivante. Lors de l'effectuation du premier pas d'une séquence de pas, le tout jeune marcheur, se comporte comme un pendule inverse simple, la durée de ce premier pas ne dépendant que de la distance au sol de son centre de gravité. Après quelques mois de marche, et comme chez l'adulte, la durée du premier pas d'une séquence de pas peut être modélisée par la demi-période d'un pendule inverse composé, dont la valeur dépend de la position au sol du CG mais aussi de sa masse et de son moment d'inertie. On peut donc dire que l'enfant au cours des premiers mois de marche se comporte comme s'il "intégrait" tout d'abord la position de son centre de gravité, puis sa masse et son moment d'inertie.

Une seconde phase, ou phase d'ajustement, correspond à une période d'affinement du contrôle de la marche. C'est durant cette étape qui prendrait fin après environ 5 à 6 années de marche indépendante, c'est à dire vers 6 ou 7 ans (Brenière & Bril, 1998; Ledebt, Bril et Brenière, 1998) que l'enfant parvient à produire une stratégie de propulsion de type adulte.

Cette période est marquée par une évolution caractéristique des valeurs de l'accélération verticale mesurée à l'instant de la transition entre simple-appui et double-appui, c'est-à-dire à l'instant où le déséquilibre est maximal (Brenière et Bril, 1998). C'est après 3 années de marche indépendante que ces valeurs deviennent positives (les valeurs adultes ne seront cependant atteintes qu'environ 2 ans plus tard), marquant ainsi un changement de stratégie de propulsion. L'enfant n'est plus en situation de chute à la fin du simple-appui. On peut donc en conclure qu'il devient alors capable, grâce à un contrôle postural unipodal plus efficace, de se propulser durant le simple-appui. Ces résultats vont dans le sens des études de Okamoto et Kumamoto (1972) qui avaient montré que ce n'est que vers 7 ans que l'enfant utilise dans la marche un pattern d'activité musculaire semblable à celui de l'adulte.

C'est aussi durant cette période que se développent les phénomènes anticipateurs - spatiaux et temporels - de la marche (Brenière et al., 1989; Ledebt et al., 1998) tels qu'ils ont été décrits chez l'adulte (Brenière & Do, 1986). Une analyse de la phase d'initiation de la marche chez des enfants commençant à marcher, ainsi que des enfants de 2,5 ans à 8 ans, permet de faire l'hypothèse que la capacité d'un contrôle proactif de l'action, n'existe pas au départ mais se construit progressivement avec l'expérience locomotrice. Ce contrôle proactif du mouvement recouvre deux fonctions essentielles : il permet tout d'abord d'anticiper le déséquilibre produit par le passage d'un appui bipodal à un appui unipodal, et donc de s'y préparer

¹¹ La demi période d'un pendule inverse simple est donné par la formule :
 $T/2 = \pi (h/g)^{1/2}$ g = force gravitaire; h = distance au sol du centre de gravité

(Bouisset & Zattara, 1981) : par ailleurs, l'activité anticipatrice a pour rôle de créer les conditions de l'action à venir. Ce deuxième aspect a été, à notre connaissance, moins systématiquement exploré. Sa fonction dans le cas de la marche est très explicite (Brenière & Do, 1986), il est la condition de la création de forces propulsives. Lors de la phase de transition entre la position debout stable et la première oscillation de la jambe, une des caractéristiques du comportement anticipateur consiste en un recul du centre des pressions (barycentre des forces réactives au sol) avant que ce dernier ne se déplace dans le sens de la marche. Brenière & Do (1986) ont montré que ce recul est, en valeur absolue, proportionnel à la vitesse qui sera atteinte à la fin du premier pas. La fonction de ce recul est donc bien de créer les conditions dynamiques de la marche.

Le mouvement de l'enfant qui commence à marcher ne présente aucune des caractéristiques de l'anticipation (Brenière et al., 1989). Ce n'est qu'après quelques mois de marche, c'est à dire au début de cette deuxième phase d'acquisition, que l'on observera certaines caractéristiques, de manière plus ou moins aléatoire tout d'abord, puis plus systématiquement à 4 ans, c'est à dire après environ 3 années d'expérience de la marche. Cependant, la présence de comportements anticipateurs, ne veut pas dire que ceux-ci soient organisés comme ils le sont chez l'adulte. En particulier, ce recul du centre des pressions n'est corrélé avec la vitesse à venir qu'à partir de 6 ans, et à 8 ans les valeurs de la corrélation restent nettement plus faibles que chez l'adulte (Ledebt et al., 1998). On constate donc que l'acquisition d'un contrôle mature de la marche nécessite pour l'enfant 7 à 8 ans d'expérience !

Une phase de transition : L'apparition du contact par le talon.

Comme nous l'avons déjà souligné, le jeune marcheur pose le pied à plat contrairement à l'adulte chez qui le contact se fait par le talon. Une analyse de la fréquence de contact par le talon en fonction de l'âge de marche montre que ce comportement apparaît brusquement au moment de la transition entre les deux périodes mises en évidence (Theilen, Brill et Brenière, 1992). La figure 10 donne la fréquence des contacts par le talon ainsi que l'évolution de la vitesse moyenne de marche en fonction du nombre de mois de marche indépendante pour un enfant. On voit très clairement que la fréquence du contact par le talon est très faible et à peu près constante durant les premiers mois, période durant laquelle la vitesse moyenne de marche augmente très sensiblement. C'est à l'époque où la vitesse de marche se stabilise qu'une augmentation très sensible de la fréquence de contact par le talon apparaît, puis continuera à progresser mais beaucoup plus lentement.

Comment expliquer ce développement présent chez chaque enfant ? Si l'apparition du contact par le talon était le produit direct de la maturation des circuits neuraux (Forsberg, 1985, 1992) on ne voit pas pourquoi il apparaîtrait pour chaque enfant à la fin de la première période d'apprentissage de la marche et ceci quelque soit la durée de cette période. Nous faisons donc l'hypothèse que le contact n'est

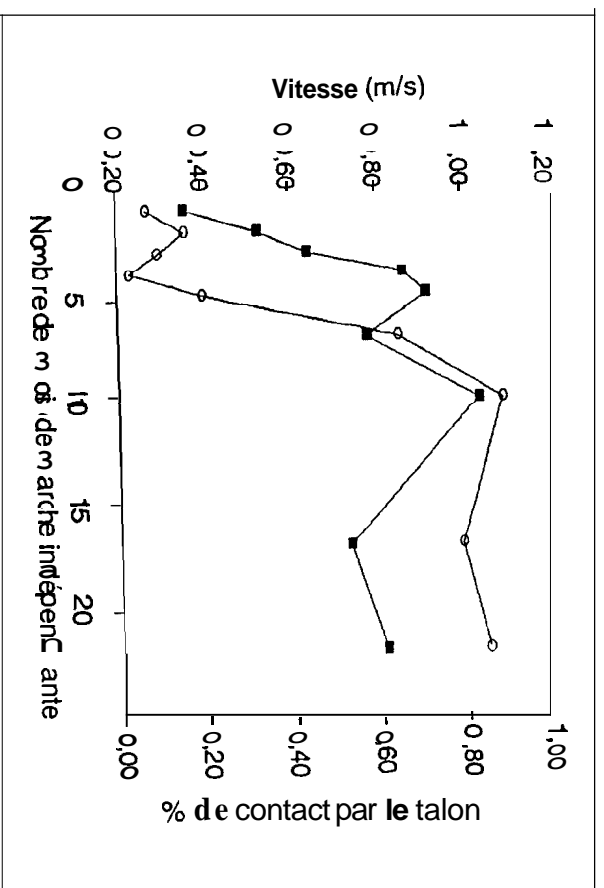


Fig. 11.: Fréquence de contact par le talon (en %) en fonction du nombre de mois de marche indépendante. Les carrés et les cercles représentent les données de Forsberg (1992).

pas lié exclusivement à la possibilité de dorsiflexion du pied comme le suggère Forsberg (1992) [que l'on observe chez l'enfant au cours de l'oscillation de la jambe bien avant cette période tout en ne conduisant pas forcément à un contact par le talon], mais à la maîtrise posturale durant l'appui unipodal. Les caractéristiques du mouvement du tout jeune marcheur, pas courts, grand écartement des pieds, durée relative du double-appui importante, etc. sont ici interprétées comme une adaptation fonctionnelle à l'instabilité de l'enfant ne permettant pas le contact par le talon. Ce ne serait qu'à partir du moment où l'enfant a acquis une maîtrise posturale suffisante que se mettrait en place un mode de locomotion plus efficace impliquant l'utilisation du contact par le talon.

DISCUSSION

Que peut nous apporter une perspective écologique des apprentissages moteurs en général, et de la marche en particulier, approche qui associe une analyse psychologique et biomécanique de l'action motrice ? L'ouverture la plus importante qu'offre cette perspective théorique me semble se situer au niveau de l'explication du comportement observable. Elle permet, en cherchant à dissocier ce qui dans le comportement dépend de contraintes biomécaniques liées aux caractéristiques du corps, des contraintes liées à l'action - le mouvement nécessite la production de forces qui sont à l'origine du mouvement -, ou encore de celles spécifiques de l'environnement, de mieux cerner les différents composants nécessaires à la réalisation de l'action (voir figures 2 et 3), ainsi que leur rôle respectif dans la réalisation de l'action. Elle permet par ailleurs de mieux poser le problème de la variabilité observable dans l'expression comportementale de l'action au niveau intra- ou inter- individuel. En guise de discussion, j'aborderai ces questions selon trois axes complémentaires : je développerai tout d'abord, à partir d'exemples simples, l'intérêt de rechercher des interprétations "économiques" aux phénomènes observés; j'aborderai ensuite la question du rôle des caractéristiques de l'environnement dans le choix d'une stratégie d'action, et terminerai par la question du rôle de l'expérience et des variations observables dans la chronologie des étapes de développement.

Une recherche d'explication "économique" aux changements observés

Grâce au recours à une modélisation qui reste bien sûr simplificatrice, nous avons vu qu'en assimilant le jeune marcheur à un pendule inverse, il a été possible de proposer l'hypothèse selon laquelle la durée du premier pas d'une séquence de pas est dans une très large mesure la conséquence de caractéristiques biomécaniques (Brenière et al. 1989; Ledebt et Brenière, 1994), ce qui permet de dire que cette durée n'est pas "programmée" mais émerge des caractéristiques de l'organisme qui effectue l'action. Ce modèle donne ainsi une explication simple des différences interindividuelles observables, de même que des changements apparaissant au cours du développement. L'enfant grandissant, son poids augmente de même que sa taille, et donc par voie de conséquence la durée du premier pas d'une séquence de pas augmentera avec l'âge. Si l'on accepte que le pendule inverse donne une assez bonne approximation d'une personne initiant une séquence de pas, les variations de durée du premier pas trouvent une explication simple et tout à fait plausible. On constate donc ici qu'une interprétation des faits en termes de maturation neurale n'est pas nécessaire pour expliquer les changements comportementaux observables.

Un second exemple plus simple encore, montre la nécessité d'avoir recours, dans un premier temps, à une recherche d'explications assez élémentaires, je dirai

même de bon sens, aux phénomènes de changements observés. Durant les quelques premiers mois de marche indépendante l'allongement du pas est remarquable [sa longueur fait plus que doubler, voir figure 12]. Sachant que l'enfant ne grandit que de quelques centimètres durant cette période, une modification de la taille ne peut en être à l'origine. De nombreux auteurs invoquent l'amélioration de la maîtrise posturale comme cause essentielle des modifications comportementales du mouvement de marche du tout jeune enfant. Tout en étant sans doute à cette époque un *paramètre de contrôle*, le contrôle postural n'est qu'indirectement la cause de cet allongement de la longueur du pas.

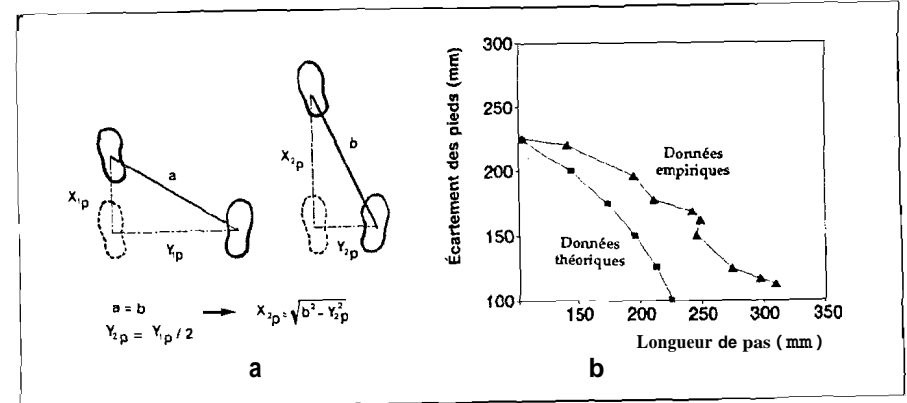


Figure 12 :

- a) Modèle géométrique donnant la relation entre écartement des pieds et longueur des pas, selon la distance entre les deux pieds;
 b) Graphique donnant la relation entre écartement des pieds et longueur des pas dans la cas théorique et dans le cas des données empiriques de la figure 5.
 (adapté de Bril et Brenière, *Journal of Motor Behavior*, 1992, p. 114)

Nous avons montré (Bril et Brenière, 1992) comment environ les 2/3 de l'augmentation de longueur du pas pouvait s'expliquer grâce à un modèle géométrique très simple (fig. 12 a). Si l'on considère que l'écartement des pieds, très important chez l'enfant (voir figure 10), est en fait une stratégie développée pour éviter que la situation de déséquilibre inhérente à la marche ne conduise à une chute, le développement de la maîtrise posturale, et donc la maîtrise des situations de déséquilibre caractéristiques de la marche, va conduire l'enfant à utiliser une base de support plus restreinte. Considérons maintenant cette importante diminution de l'écartement des pieds au cours des premiers mois de marche indépendante : si l'on prend en compte le fait que l'écartement des pieds diminue de moitié durant cette période, et si l'on considère la situation où l'enfant garde constante la distance entre les deux pieds, il en découle une augmentation presque équivalente de la longueur du pas. En fait, comme le montre la figure 12 b, l'augmentation observée de la longueur du pas est supérieure à celle que donne le modèle géométrique proposé. Une recherche d'explication supplémentaire est donc nécessaire. L'augmentation

de la taille de l'enfant peut jouer un rôle mais faible puisqu'il ne grandit pas de manière significative durant ces quelques mois. Un calcul simple là aussi permet donc d'évaluer ce qui dans l'augmentation de la longueur du pas peut être imputé à sa croissance. En fait, l'augmentation du contrôle postural unipodal, permet à l'enfant non seulement une durée d'appui unipodal plus longue mais aussi la capacité de mouvoir son corps vers l'avant durant l'appui unipodal, grâce notamment au déroulé du pied, ce dont le tout jeune marcheur n'est pas capable. C'est donc à cette nouvelle capacité posturale que l'on peut imputer la part de l'augmentation de longueur du pas qui ne revient ni à la diminution d'écartement des pieds, ni à la croissance de l'enfant.

L'exemple de l'augmentation de la longueur du pas illustre clairement comment, à partir du cadre théorique proposé ici, la recherche d'explication est basée d'abord sur une évaluation de principes simples issus des contraintes biomécaniques du sujet et celles de la tâche.

Propriétés de l'environnement et stratégie locomotrice

Le deuxième point que je souhaiterais commenter ici concerne les choix de stratégie d'action, selon le niveau de maîtrise de la tâche par l'enfant. Dans ce chapitre nous avons implicitement raisonné sur une situation simple, la marche en ligne droite, sur un sol homogène et horizontal, sans obstacle. Or dans la vie courante, cette situation est relativement inhabituelle. Une question qui reste ainsi dans l'ombre est celle du choix, par l'enfant d'une stratégie d'action adaptée. Prenons le cas d'un enfant de 14 mois bon marcheur, mais qui soudain, face à une pente de 10 à 15 degrés se refuse à s'engager dans la descente alors qu'il la monterait sans problème en marchant ou en se mettant à quatre pattes (Adolph et al. 1993; Adolph, 1997). Où encore le changement de stratégie de marche de l'enfant non voyant dès lors que sa mère lui met légèrement la main sur l'épaule (Sampaio, Bril & Brenière, 1989). L'approche écologique permet une explication simple et "économique" à ces phénomènes.

Le cas de l'enfant de 14 mois, devient relativement aisé à expliquer. Les propriétés de l'environnement ont changé, entraînant de ce fait une modification importante de la tâche. Monter, ou plus encore descendre une pente nécessite pour l'enfant de construire une nouvelle stratégie de production et de modulation de forces propulsives, très différentes l'une de l'autre. Cette nouvelle stratégie nécessite pour se mettre en place que l'enfant puisse explorer les propriétés du nouveau couple environnement-tâche et découvrir de nouvelles solutions motrices adaptées (Adolph, 1993).

La situation de l'enfant non voyant est elle aussi intéressante. Les résultats que nous avons obtenus, bien que préliminaires et nécessitant d'être confirmés, suggéraient qu'il n'y avait pas de différence notable dans les stratégies motrices utilisées par ces enfants dans les premières semaines de marche (Sampaio et al., 1989). Ainsi ce ne serait qu'au moment où l'enfant a la capacité de se déplacer

aisément dans l'espace, que l'absence de vision le contraint à adopter une stratégie qui ne l'expose pas à heurter un obstacle. L'enfant utilise une stratégie d'exploration de l'espace à partir d'une succession de pas dont un sur deux a une longueur nulle (après avoir fait un pas, le pied controlatéral est ramené à hauteur de l'autre). La main de la mère sur l'épaule de l'enfant, lui procure un point d'ancrage dans l'espace qui rend sans objet la stratégie développée par l'enfant. Il a donc suffi d'un élément nouveau, apparemment mineur, mais essentiel dans le cas de l'enfant non voyant, pour que l'organisation comportementale de son action soit substantiellement modifiée.

Les effets possibles de l'expérience

Si comme cela a été suggéré tout au long de ce chapitre, l'acquisition de la marche relève d'un processus d'apprentissage, alors ce processus doit être sensible à l'expérience de l'enfant et en particulier aux conditions "d'exercice" auxquelles il peut être soumis. Nous avons vu dans le cas de l'acquisition de la marche à quatre pattes que l'expérience du ramper conduisait à une efficacité plus grande dans la marche à quatre pattes, au point que l'on ne retrouvait pas pour la marche indépendante puisque la pratique du ramper aurait plutôt tendance à en retarder les débuts. Une question peu débattue alors qu'elle est souvent présente à l'esprit concerne l'âge d'acquisition de la marche. On constate des variations importantes dans nos cultures dont rend compte la figure 1. Dans l'échelle de Bayley, on obtient une fourchette de 8 mois pour l'acquisition de la marche indépendante, les âges donnés allant de 9 à 17 mois. Des variations moyennes encore plus grandes apparaissent si l'on prend en compte la chronologie de développement observée dans des populations d'enfants africains par exemple, où l'avance du développement (comparativement aux normes en vigueur dans nos pays, c'est à dire aux tests de développement) est étonnant. Considérons le développement d'enfants ougandais tel que le rapporte M. Geber (1973) dans les années 1960 :

Les trois premiers mois c'était surtout la motricité de l'axe corporel qui était remarquable : ils tenaient leur tête droite dès un mois, et pouvaient rester assis soutenus plus de 10 minutes à trois mois. Dès quatre mois ils étaient capables d'être assis sans soutien, se penchant en avant, se redressant. A huit mois ils tenaient debout seuls, à 10 mois ils marchaient, à 12 mois ils couraient.

Ces âges sont éloquentes par eux-mêmes et correspondent assez bien à ce que les femmes bambara du Mali, ou bacongo du Congo Brazzaville rapportent comme âge d'acquisition des grandes étapes de la motricité précoce (Bril, Zack & Hombessa-Nkounkou, 1989). Ainsi par exemple, les femmes bambara que l'on avait interrogées étaient unanimes pour dire que l'enfant doit tenir assis entre trois et quatre mois, et doit marcher pour son premier anniversaire.

Quelles explications donner à cette "avance" de développement ? A l'époque des travaux de Geber (1960, 1973) l'option théorique qui prévalait, à savoir, le développement moteur est le reflet du développement du système nerveux, proposait l'existence chez ces enfants d'une avance de la maturation neurologique dès la

naissance. Cette hypothèse d'une plus grande maturité du système nerveux à la naissance n'a cependant pas, à notre connaissance, été démontrée par la suite de manière convaincante (Warren & Parkin, 1974). Si l'on analyse ces données culturelles de plus près, un constat s'impose d'emblée : l'avance constatée n'est pas uniforme. Super (1976) ou Kilbride et Kilbride (1980) par exemple montrent clairement un développement différentiel selon que l'activité concernée est ou non encouragée de manière spécifique par l'entourage : les aptitudes motrices valorisées par la culture font l'objet d'un entraînement explicite ou d'un encouragement permanent par le biais des pratiques de soins (voir aussi Bril, 1997). Ainsi chez les baganda du Kenya, les enfants sont remarquablement précoces pour les conduites de sourire et pour le maintien de la position assise (Kilbride, 1980), deux aptitudes psychomotrices dont l'apparition, dans cette culture, constitue les événements clef des six premiers mois de la vie. A l'opposé, un comportement tel que le ramper, qui n'est pas particulièrement encouragé, apparaît légèrement plus tardivement que pour l'échantillon d'enfants d'Amérique du Nord.

La thèse de S. Valentin (1970) apporte un élément supplémentaire essentiel à notre propos. Dans son étude de la fonction manipulateur chez l'enfant sénégalais dans les deux premières années, l'auteur note l'existence d'une remarquable avance de la motricité axiale et de l'équilibre postural, alors que la coordination et la motricité segmentaire évoluent de manière plus comparable à la "norme" généralement admise. Une explication avancée serait liée à la forte valorisation dans la culture wolof de la maîtrise de l'axe du corps, et de l'équilibre postural, deux éléments essentiels comme nous l'avons vu à l'acquisition de la marche.

Ainsi, la maîtrise posturale très précoce observée chez des enfants africains (Geber, 1973) pourrait être considérée comme *paramètre de contrôle*. Ce dernier influence à un moment donné l'assemblage des éléments constitutifs du système, le poussant vers un type d'organisation nouvelle. L'expérience posturo-motrice d'enfants Bambara du Mali par exemple, extraordinairement plus diversifiée et intense que celle d'enfants parisiens (Bril, 1997) pourrait être à l'origine d'une maîtrise posturale nettement plus précoce, qui à son tour serait un élément essentiel dans la transition vers la marche indépendante. Il n'est ainsi pas besoin d'invoquer une avance de maturation du système nerveux à la naissance, pour expliquer des âges plus précoces pour l'acquisition de différentes habiletés motrices et de la marche en particulier.

Une réserve cependant souvent adressée aux comparaisons culturelles, concerne les importantes variations dans les conditions de vie et donc dans les paramètres qui peuvent influencer sur le développement, paramètres difficiles à contrôler. Il faudrait donc pouvoir avoir recours à des études plus expérimentales impliquant un contrôle rigoureux de l'expérience de l'enfant. Cependant on imagine aisément les difficultés matérielles d'une telle entreprise, mais surtout les questions d'éthique que ne manqueraient pas de poser de telles situations. On dispose malgré tout de quelques études discutant les effets d'un entraînement à la marche durant la période pré-locomotrice, sur l'âge d'apparition de la marche indépendan-

te. L'étude la plus connue est sans doute celle de Zelazo et collaborateurs (Zelazo, Zelazo et Kolb, 1972; Zelazo et al., 1983). Ces auteurs ont montré qu'un entraînement actif quotidien (2mn 30s) de la marche automatique dès l'âge de deux semaines (l'enfant est l'acteur de son action) a conduit à une acquisition de la marche indépendante plus précoce (plusieurs semaines) comparativement à un groupe d'enfants non entraînés ou entraînés passivement (les membres inférieurs sont exercés par une tierce personne l'enfant étant couché sur le dos). De plus l'entraînement à la marche avait pour conséquence la persistance du réflexe de marche automatique. Le travail de thèse de S. Maciaszczyk-Jedeau (1992)¹² tout en confirmant les résultats de l'étude de Zelazo et al. (1972) montre que l'exercice a un impact significatif sur la posture et la stabilité du corps lors de l'effectuation d'une séquence de pas, à l'époque de la fin de l'entraînement, c'est à dire à 3 mois : la position de la tête et du tronc est redressée et proche de celle de l'adulte, le pied est posé au sol à plat, contrairement aux enfants du groupe témoins chez qui le corps est moins redressé et le posé du pied se fait plus fréquemment de manière digitigrade (par la pointe du pied); en outre l'entraînement à la marche favorise l'attention portée aux objets lointains.

Bien que dans ces études l'entraînement est relativement réduit (moins de 3 minutes par jours) son effet se fait sentir d'une part sur l'activité posturale de l'enfant à la fin de la période d'entraînement, et d'autre part, à plus long terme, sur la date d'apparition de la marche. Il est intéressant de noter que son effet sur la maîtrise posturale rejoint les descriptions que donne Valentin (1970) du développement de l'enfant wolof.

Un type d'expérience différente, l'entraînement sur tapis roulant, a été utilisé par Vereijken et Thelen (1997) avec des enfants de 3 et 7 mois. Malgré quelques réserves dues au faible nombre d'enfants de cette étude (10 enfants) en regard au nombre important de situations expérimentales (5 conditions), certaines de leurs conclusions sont néanmoins intéressantes. Dans tous les cas l'entraînement renforce les patterns alternés d'activité des membres inférieurs. L'effet de l'entraînement dépend des performances initiales de l'enfant, en particulier l'effet sera important sur un pattern de marche instable. De même il semble que l'entraînement renforce les patterns préférés lors de la première séance d'entraînement.

Ces quelques données montrent clairement que s'il existe un effet indéniable de l'entraînement sur le développement locomoteur, il reste difficile d'évaluer l'impact précis sur les différents composants de l'activité motrice. Un aspect semble cependant relativement clair : toute stimulation posturale de l'axe vertébral, tout renforcement de l'activité musculaire des jambes semble avoir un effet bénéfique sur l'acquisition de la marche.

¹² Neuf enfants ont été entraînés dans des conditions analogues à celles de l'étude de Zelazo et al (1972) bien que sur une durée un peu plus longue, de l'âge de 2 semaines à 12 semaines

CONCLUSION

L'acquisition de la marche chez l'homme, relève-t-elle d'un processus de maturation génétiquement déterminé, ou bien d'un processus d'apprentissage ? Les données présentées dans ce chapitre suggèrent que, de même que pour nombre d'habiletés motrices "culturelles", écrire, jouer d'un instrument de musique, exécuter des pas de danse ou descendre une piste de ski, l'acquisition de la marche nécessite un long processus d'apprentissage. Le fait que la quasi totalité des enfants du monde apprennent à marcher, alors que tous n'apprendront pas à jouer du piano ou à manger avec des baguettes, constitue un argument souvent avancé pour justifier une approche innéiste du développement de la marche. Cet argument doit être dépassé. Ce n'est pas parce que le corps humain est morphologiquement adapté à l'activité de marche bipède, que l'action de marcher est "innée". McGraw (1932) le soulignait déjà il y a bientôt 70 ans, l'enfant doit apprendre non seulement à maîtriser les forces gravitaires, mais aussi à les utiliser (Bernstein, 1967) afin d'optimiser la réalisation de ce mouvement particulier qui donne naissance à la marche. Nous avons souligné tout au long de ce chapitre le long apprentissage de la maîtrise de ces forces nécessaires à un contrôle fin et flexible du mouvement, qui doit permettre à tout instant une adaptation optimale aux aléas de l'environnement.

BIBLIOGRAPHIE

- ADOLPH, K.E., EPPLER M. & GIBSON, E. (1993). Crawling versus walking infants' perception of affordances for locomotion over sloping surfaces. *Child Development*, 64, 1158-1174.
- ADOLPH, K.E., VEREIJKEN, B. & DENNY, M.A. (1998). Learning to crawl. *Child Development*, 69, 1299-1312.
- BAI, D.L., BERTENTHAL, B.I. (1992). Locomotor status and the development of spatial search skills. *Child Development*, 63, 215-226.
- BAYLEY, N. (1969). Bayley scales of infant development. New York : Psychological Corporation.
- BENSON, J.B. (1990). The significance and development of crawling in human infancy. Dans J.E. Clark et J.H. Humphrey (Eds.) *Advances in motor development research* 3 (pp. 91-142). New York : AMS Press.
- BRENIÈRE, Y., & DO, M.C. (1986). When and how does steady state gait movement induced from upright posture begin ? *Journal of Biomechanics*, 19, 1035-1040.
- BRENIÈRE, Y., DO, M.C. & BOUISSET, S. (1987). Are dynamic phenomena prior to stepping essential to walking ? *Journal of Motor Behavior*, 19, 62-76.
- BRENIÈRE, Y., & BRIL, B. (1988). Pourquoi l'enfant marche-t-il en tombant, alors que l'adulte tombe en marchant ? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, série 3*, 307, 617-622.
- BRENIÈRE, Y., BRIL, B., & FONTAINE, R. (1989). Analysis of the transition from upright stance to steady state locomotion for children under 200 days of autonomous walking. *Journal of Motor Behavior*, 21, 20-37.
- BRENIÈRE, Y., & BRIL, B. (1998) Development of postural control of gravity forces in children during the first five years of walking. *Experimental Brain Research*, 121, 255-262.
- BRIL, B. (1997) Culture et premières acquisitions motrices : enfants d'Europe, d'Asie et d'Afrique. *Journal de Pédiatrie et de Puériculture*, 10, 302-314.
- BRIL, B., & BRENIÈRE, Y. (1991). Temporal invariances in toddlers' gait. In J. Fagard, P. Wolff (Eds.), *The development of timing control and temporal organization in coordinated action*. Amsterdam: Elsevier.
- BRIL, B., & BRENIÈRE, Y. (1992). Postural requirements and progression velocity in young walkers. *Journal of Motor Behavior*, 105-116.
- BRIL, B., ZACK, M. & HOMBESSA-NKOUNKOU, E. (1989) Ethnotheories of development and education : a view from different cultures. *European Journal of Psychology of Education*, numéro spécial : "Infancy and Education", 4, 307-318.
- BRUNET, O., LÉZINE, I. (1951). Echelle de Développement psychologique de la première enfance. Issy les Moulineaux: Etablissement d'applications psychotechniques.
- BOUISSET, S., & ZATTARA, M. (1981) A sequence of postural movement precedes voluntary movement. *Neuroscience lettres*, 22, 263-270.
- BURNETT, C.N., & JOHNSON, E.W. (1971). Development of gait in childhood. Part I: Method. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 13, 196-206.
- CAVAGNA, G.A., FRANZETI, P. & FUCHIMOTO, T. (1983) The mechanics of walking in children. *Journal of Physiology*, 343, 323-339.
- CLARK, J.E., & PHILLIPS, S.J. (1987). The step cycle organization in infant walkers. *Journal of Motor Behavior*, 19, 421-433.
- CLARK, J.E., Trully, T. & Phillips S. J. (1993). On the development of walking as a limit-cycle system. Dans L. Smith & E. Thelen (Eds.), *A dynamic system approach to development* (pp 71-93). Cambridge : MIT Press.
- DUPOUX, E., MELHER, J. (1990). *Naître humain*. Paris : Odile Jacob.
- FRANKENBURG, W.K., DODDS, J.B. (1967). The Denver Developmental Screening Test. *Journal of Pediatrics*, 71, 181-191.
- FORSSBERG, H. (1985). Ontogeny of human locomotor control. *Experimental Brain Research*, 57, 480-493.
- FORSSBERG, H. (1992) A neural control model for human locomotion development : implication for therapy. Dans M. Hebbelinc & R.J. Shephard (Eds.), *Movement disorders in children*, (pp. 174-181). Bâle. Karger.
- GEBER, M. (1973). L'environnement et le développement de l'enfant africain. *Enfance*, 26, 145-174.
- GESELL, A. (1946). The ontogenesis of infant behavior. Dans L. Carmichael (Ed.) *Manual of child psychology*, (pp 295-331). New York : Wiley.
- GESELL, A., Ames, (1940). The ontogenetic organization of prone behavior in human infancy. *Journal of Genetic Psychology*, 56, 247-263.
- GRILLNER, S. (1975). Locomotion in vertebrate: central mechanisms and reflex interaction. *Physiological Review*, 55, 247-304.
- JO, SHUN-SINGH (1989). Puériculture Coréenne - Tradition et modernité. Mémoire de Diplôme de l'EHESS.
- KEOGH, J., SUGDEN, D. (1985). *Movement skill development*. New York : Macmillan Publishing Company.
- KERMOIAN, R. CAMPOS, J.J. (1988). Locomotor experience : a facilitator of spatial cognitive development. *Child Development*, 59, 908-917.

- KILBRIDE, P.L. (1980). Sensori-motor behavior of Baganda and Samia infants, a controlled comparison. *Journal of Cross-cultural Psychology*, 11, 88-107.
- KOUPERNIK, C., DAILLY, R. (1968/1980). Développement *neuro-psychique* du nourrisson. Paris : P.U.F.
- LEDEBT, A., BRENIÈRE, Y. (1994). Dynamical implication of anatomical and mechanical parameters in gait initiation process in children. *Human Movement Science*, 13, 801-815.
- LEDEBT, A. ET BRIL B. (2000). The acquisition of upper body stability during walking in toddlers. *Developmental Psychobiology*, 36, 311-324.
- LEDEBT, A., BRIL, B., & BRENIÈRE, Y. (1998). The build up of anticipatory behavior: an analysis of the development of gait initiation in children. *Experimental Brain Research*, 120, 9-17.
- MACIASZCZYK-JEDEAU, S. (1992). De la marche automatique à la marche autonome : effet d'un exercice précoce. Thèse de Doctorat, Université René Descartes et EPHE.
- MCGRAW, M.B. (1932). From reflex to muscular control in the assumption of an erect posture and ambulation in the human infant. *Child Development*, 3, 291-297.
- NEWELL K.M. (1986) Constraints on the development of coordination. In M.G. Wade & H.T.A. Whiting (Eds.). *Motor skill acquisition*. Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- NEWELL K.M., SCULLY D.M., McDONALD P.V. & BAILLARGEON R. (1989) Task constraints and infant grip configurations. *Developmental Psychobiology*, 22, 817-831.
- OKAMOTO, T., & KUMAMOTO, M. (1972). Electromyographic analysis of the learning process of walking infants. *Electromyography*, 12, 149-58.
- RIVIÈRE, J. (2000). Motricité et cognition : des relations controversées. In J. Rivière (Ed.), *Le développement psychomoteur du jeune enfant*, (pp 173-287). Marseille : SOLAL.
- SAMPAIO E., BRIL, B. & BRENIÈRE, Y. (1989) La vision est-elle nécessaire pour apprendre à marcher ? Etude préliminaire et approche méthodologique. *Psychologie Française*, 34(1), 71-78.
- SHIRLEY, M.M. (1931). *The first two years. Vol 1. Postural and locomotor development*. Mineapolis: The University of Mineapolis Press.
- SUPER, C. (1976) Environmental effect on motor development :the case of "African infant precocity". *Developmental Medicine and Child Neurology*, 18, 561-567.
- SUTHERLAND, D.H., OLSEN, R., BIDEN, E.N., & WYATT, M.P. (1988). *The development of mature walking*. Oxford : Blackwell Scientific Publications Ltd.
- THELEN, E. (1983). Learning to walk is still an "old" problem: a reply to Zelazo. *Journal of Motor Behavior*, 15, 139-61.
- THELEN, E. (1986). Development of coordinated movement: Implication for early human development. In M.G. Wade & H.T.A. Whiting (Eds.), *Motor skill acquisition*. Dordrecht: Martinus Nijhoff.
- THELEN, E., BRIL, B., & BRENIÈRE, Y. (1992). The emergence of heel strike in newly walking infants: a dynamic interpretation. In F. Horak & M. Wollacott (Eds.), *Posture and Gait: Control Mechanisms*, (pp 334-337). University of Oregon Book.
- THELEN, E., FISHER, D.M. & RIDLEY-JOHNSON, R. (1984) The relationship between physical growth and a newborn reflex. *Infant Behavior and Development*, 7, 479-493.
- THELEN, E., KELSO, J.A. & FOGEL, A. (1986) Self organizing systems in infant motor development. *Developmental Review*, 7, 39-65.
- THELEN, E. & SMITH, L. B. (1994) *A dynamical systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge: MIT Press.
- THELEN, E., & ULRICH, B.D. (1991). Hidden precursor to skill: A dynamical system analysis to treadmill-elicited stepping during the first year. Monograph of the Society for Research in Child Development, 56 (1, serial No. 223).
- THELEN, E., ULRICH B.D., & JENSEN, J.L. (1989). The developmental origin of locomotion. In M.H. Woollacott & A. Sumway-Cook (Eds.), *The development of posture and gait across lifespan*, (pp 25-47). Columbo : University of South Carolina Press,
- VALENTIN, S. (1970). Le développement de la fonction *manipulatoire* chez l'enfant sénégalais au cours des deux premières années de la vie. Thèse de 3ème cycle, Université de Paris.
- VEREIJKEN, B. & THELEN, E. (1997) Training infant treadmill stepping: the role of individual pattern stability. *Developmental Psychobiology*, 30, 89-102.
- WARREN N. & PARKIN J.M. (1974) A neurological and behavioral comparison of African and European newborns in Uganda. *Child Development*, 45, 966-971
- ZELAZO, P.R., ZELAZO, N.A., KOLB, S. (1972). "Walking" in the newborn. *Science*, 176, 314-315.
- ZELAZO, P.R. (1983). The development of walking, new findings and old assumptions. *Journal of Motor Behavior*, 15, 99-137.