

Regard scientifico-mathématique

sur les mouvements en éducation somatique

par **Jacques BAIR**

Pratiquer l'éducation somatique peut procurer du bien-être psychosomatique (voir [1]). Il s'agit essentiellement d'exécuter des mouvements corporels possédant certaines propriétés caractéristiques. Celles-ci sont examinées d'un point de vue mathématique en fondant l'étude, réalisée avec l'assistance d'une Intelligence Artificielle (IA, en abrégé) ¹, sur des théories scientifiques élaborées notamment par T. Hanna et A. Berthoz.

1. Présentation succincte de l'éducation somatique

L'éducation somatique est une approche pédagogique du corps en mouvement qui vise à développer la conscience corporelle à travers l'expérience sensorielle et motrice. Elle ne cherche pas à corriger un dysfonctionnement ou à réaliser une performance sportive de haut niveau, mais elle vise à permettre au pratiquant de mieux comprendre son fonctionnement corporel afin d'optimiser son organisation intérieure.

Elle se base sur quelques principes généraux fondamentaux, tels que :

- le corps est perçu de l'intérieur, comme un sujet vivant (le "soma") et non comme un objet à traiter ;
- elle cherche à établir une connexion et une harmonisation entre le corps et l'esprit ;
- l'apprentissage se fait par expériences ; il est basé sur le ressenti et l'exploration personnelle lors de la réalisation d'exercices adéquats et précis ;
- elle favorise l'autonomie, la santé globale et le bien-être physique et psychique ;
- elle s'adresse à tous, sans distinction d'âge ou de condition physique.

Elle se compose de méthodes d'apprentissage et de pratique, dont les deux plus anciennes sont très connues : le Yoga qui provient d'Inde (son origine remonte à plus de 5000 ans) et le Qi Gong d'origine chinoise (puisant ses racines de la médecine traditionnelle chinoise pratiquée depuis 4000 à 5000 ans).

Ces méthodes ancestrales se sont modernisées et développées. Elles ont servi d'inspiration pour la naissance d'une multitude de méthodes modernes qui visent les mêmes objectifs que leurs ancêtres et profitent des développements de la technologie et des savoirs acquis depuis lors par des scientifiques issus d'origines diverses (par exemple, des physiciens, ingénieurs, psychologues, psychiatres, neuroscientifiques, philosophes, ...) ; parmi les nombreuses méthodes modernes, épinglons, en particulier pour leur importance, la Technique Alexander [10], la méthode Feldenkrais [6] ou la somatique de Hanna [7]. Un aperçu de ces méthodes est donné dans [1].

Toutes ces méthodes sont censées apporter de nombreux bienfaits psychosomatiques (c'est-à-dire pour le corps physique et l'esprit) ; citons notamment :

- amélioration de la posture et de la respiration ;

¹ En l'occurrence, l'IA Microsoft Copilot.

- apport de bien-être et d'énergie par le mouvement (comme l'indique le titre du livre [6]) ;
- réduction du stress et des douleurs chroniques ;
- meilleure expressivité et efficacité dans le mouvement ;
- soutien à la performance (artistique ou sportive).

2. Généralités sur les mouvements corporels

Nous nous intéressons ici aux mouvements corporels, c'est-à-dire aux mouvements du corps entier ou d'une de ses parties. Ils sont provoqués par le système sensori-moteur ; celui-ci décrit l'interaction entre la prise d'informations par les sens et la commande des muscles pour produire un mouvement.

La sensorialité ² correspond à l'acheminement des signaux (vision, audition, proprioception ³, tact, etc.) vers le système nerveux central, tandis que la motricité ⁴ désigne la génération de commandes nerveuses pour la contraction musculaire.

De ce point de vue, on pourrait donc concevoir le corps humain comme un vaste réseau de capteurs recevant des informations envoyées au cerveau qui commande les mouvements. En pratique, le processus se déroule selon une chaîne de transformations sensorimotrices qui comprend les points suivants :

- a) réception des stimuli externes et internes par les récepteurs ;
- b) transmission des informations via les fibres afférentes jusqu'aux aires corticales et sous-corticales ;
- c) traitement central et élaboration d'un plan moteur adapté à la tâche et au contexte ;
- d) transmission de la réponse motrice via les voies efférentes ;
- e) exécution du mouvement et rétroaction (ou, en jargon technique, effet de *feedback*) permettant de corriger en temps réel erreurs et imprécisions.

Bien entendu, l'expérience motrice modifie en permanence la chaîne sensorimotrice grâce à la plasticité neuronale.

Le mécanisme d'« adaptation sensorimotrice » permet de recalibrer les transformations entre entrées sensorielles et sorties motrices pour maintenir la performance lorsque les propriétés du corps ou de l'environnement évoluent.

Les mouvements volontaires se décomposent en trois phases corticales :

- a) sélection et planification dans le cortex préfrontal ;
- b) séquençage des gestes au niveau du cortex prémoteur ;
- c) exécution via le cortex moteur primaire

La coordination entre ces phases et le retour sensoriel (proprioceptif ⁵, vestibulaire ⁶, visuel) assure la précision des gestes quotidiens comme, par exemple, lever un bras ou marcher.

² La sensorialité désigne l'ensemble des fonctions sensorielles d'un être vivant, c'est-à-dire sa capacité à percevoir le monde à travers ses sens.

³ La proprioception est la capacité du corps à percevoir sa position et ses mouvements dans l'espace, même sans l'aide de la vue.

⁴ La motricité est l'ensemble des fonctions motrices, c'est-à-dire la capacité à se mouvoir et à effectuer des mouvements.

⁵ Le qualificatif « proprioceptif » provient évidemment du mot « proprioception » ; il se rapporte donc à la sensibilité du système nerveux aux informations provenant des muscles, des articulations et des os.

⁶ Le système vestibulaire est un organe sensoriel, situé dans l'oreille interne, qui contribue à la sensation de mouvement et à l'équilibre.

En conclusion, chaque mouvement corporel résulte d'un dialogue constant entre :

- la détection sensorielle ;
- le traitement central et la planification ;
- l'activation musculaire ;
- la rétroaction corrective.

Cette interaction complexe sous-tend notre capacité à adapter et affiner nos mouvements en fonction des changements internes et externes.

3. Théorie de Hanna

L'américain Thomas Hanna (1928 – 1990) était un philosophe et chercheur en neurophysiologie, professeur à l'Université de Chicago. Il s'est formé à la méthode Feldenkrais⁷ qu'il a enseignée après l'avoir apprise auprès de Moshe Feldenkrais lui-même. En 1976, il a forgé le terme « *somatics* » pour désigner l'éducation somatique et a publié l'ouvrage [7] qui explore à la fois la pratique et la philosophie du mouvement conscient. Hanna conçoit le mouvement comme un acte d'auto-éducation sensorimotrice. Ses principaux apports sont assez nombreux. En voici un aperçu.

- Le concept d'« amnésie sensorimotrice ». Selon Hanna, de nombreuses douleurs ou raideurs musculaires, notamment celles liées à la vieillesse, sont dues à une perte de mémoire du corps, une difficulté à sentir et à contrôler certains mouvements. Plus précisément, l'auteur identifie dans son ouvrage *Le mythe du vieillissement* [8] trois réflexes de stress fondamentaux qui influencent notre posture et notre bien-être corporel : le réflexe feu vert⁸, le réflexe feu rouge⁹, et le réflexe de trauma¹⁰ ; ceux-ci sont inconscients et peuvent persister longtemps après l'événement déclencheur¹¹, contribuant à ce que Hanna appelle l'amnésie sensorimotrice (en abrégé AMS) qui est donc l'incapacité à sentir et contrôler certains muscles, de sorte que le cerveau peut oublier de relâcher certaines tensions musculaires chroniques.

⁷ Moshé Feldenkrais (1904 – 1984) était un scientifique, qui a obtenu un diplôme d'ingénieur en mécanique et électricité à Paris ; il a travaillé avec des scientifiques de renom tels que le physicien Paul Langevin. Il était également un sportif (en judo) de haut niveau. Après une blessure au genou, il a développé une méthode nouvelle de soins, qui porte désormais son nom ; celle-ci est inspirée des connaissances de l'auteur en neurosciences, en physique (en mécanique) et en biologie.

⁸ Le réflexe « feu vert » correspond au réflexe d'étirement (ou myotatique) : lorsqu'un muscle s'allonge, les fuseaux neuromusculaires envoient un signal au système nerveux pour provoquer une contraction proportionnée ; ce mécanisme assure la tonicité posturale, l'élasticité et la fluidité du mouvement ; quand il fonctionne librement, il permet de bouger sans effort conscient ni rigidité.

⁹ Le réflexe « feu rouge » est un réflexe de protection émotionnelle et musculaire : face à une menace, un choc ou un stress intense, il déclenche une contraction réflexe mais prolongée, comme pour « geler » le corps. Cette contraction vise à prévenir les blessures, mais, si elle se répète ou devient chronique, elle instaure une tension permanente. Son activation excessive est une des clés de l'amnésie sensorimotrice, car elle inhibe la sensibilité et la mobilité naturelles du muscle.

¹⁰ Le réflexe « trauma » est une réaction involontaire du corps à une douleur soudaine ou à un choc émotionnel. Il se manifeste par une torsion asymétrique du tronc, souvent accompagnée d'une contraction musculaire d'un seul côté du corps. Il se manifeste par une torsion asymétrique du tronc, souvent accompagnée d'une contraction musculaire d'un seul côté du corps.

¹¹ Ils sont d'ailleurs parfois qualifiés d'« archaïques ».

- La « pandiculation »¹² permet de combattre des amnésies sensorimotrices. Il s'agit d'un étirement instinctif et délicat suivi d'une contraction volontaire, puis d'une progressive relaxation pour déprogrammer la contraction chronique et reconfigurer le système nerveux central. Un exemple emblématique de pandiculation est un bâillement profond avec un lent relâchement total. Concrètement, la pandiculation prônée par Hanna peut être avantageusement combinée avec la méthode de relaxation musculaire progressive de E. Jacobson¹³ (qui consiste en une contraction volontaire d'un muscle suivie d'une observation du relâchement).
- L'auteur met en évidence l'importance des mouvements lents, simples et conscients, exécutés idéalement en position allongée, pour déprogrammer les schémas musculaires appris et restaurer une fluidité naturelle.
- Concrètement, T. Hanna met en place une « Formation Somatique » éponyme, centrée sur le relâchement actif des tensions, la rééducation neuromusculaire et la prise de responsabilité de chacun dans son processus de santé et de mouvement.

En fait, pour T. Hanna, l'appellation « éducation somatique » désigne une méthode d'« auto-éducation » sensori-motrice dont l'objectif est de rétablir un schéma musculaire naturel.

4. Théorie de Alain Berthoz

Alain Berthoz est né le 18 février 1939 à Neuilly-sur-Seine. Il est un neurophysiologiste français reconnu pour ses travaux sur la perception, l'action et la physiologie intégrative, et a été professeur au Collège de France de 1993 à 2009 ; il est actuellement professeur honoraire au Collège de France, titulaire de la chaire de physiologie de la perception et de l'action, et directeur du laboratoire de neurophysiologie de l'action. Ses travaux lient neurosciences, modélisation et phénoménologie pour comprendre comment le cerveau perçoit et produit le mouvement. Notamment, il analyse, de façon rigoureuse (et très poussée mathématiquement) le sens du mouvement dans son ouvrage [3]. Il a par ailleurs écrit une trentaine d'autres livres. Voici quelques idées fondamentales défendues par ce scientifique.

- Il affirme que la kinesthésie¹⁴ est aussi essentielle que les cinq sens classiques ; il la considère d'ailleurs comme un « sixième sens ». Elle permet de penser avec tout le corps, pas seulement avec le cerveau.
- Selon lui, le cerveau n'est pas un simple centre de commande, mais un « simulateur » qui anticipe les mouvements et teste des hypothèses via les sens. Les commandes motrices seraient élaborées localement par les organes eux-mêmes.
- Pour lui, il n'y a pas de mouvement sans pensée. La kinesthésie est donc intimement liée à la prise de décision, à la mémoire spatiale et à la construction de la cohérence perceptive.
- Il étudie des modèles internes proactifs, générés par le cerveau pour anticiper trajectoires et forces, minimisant ainsi les variations brusques d'accélération¹⁵.

¹² Le mot « pandiculation » vient du latin « *pandiculari* », qui signifie s'étendre, s'allonger.

¹³ Edmund Jacobson (1888 – 1983) était un médecin, psychologue, psychiatre et physiologiste américain bien connu pour avoir mis au point une méthode de relaxation éponyme.

¹⁴ Il s'agit de la perception du mouvement en cours, tandis que le proprioception englobe une perception plus large de la relation du corps à l'espace..

- Il insiste sur l'existence de synergies motrices, regroupements de muscles coordonnés pour produire des trajectoires lisses et continues, sans à-coups.
- Il génère des hypothèses de trajectoire et charge les capteurs kinesthésiques (vestibulaires, proprioceptifs, visuels) de les vérifier en temps réel. L'analyse mathématique de ces trajectoires, via leurs dérivées successives (vitesse, accélération, ...), permet de comprendre finement comment le système nerveux anticipe, module et corrige la motricité. Cette approche nourrit à la fois la théorie et la pratique de l'éducation somatique, en proposant des clés pour guider l'apprentissage et la rééducation motrice.

Au surplus, il analyse en profondeur, dans deux livres [4] et [5], les deux concepts importants, pour notre propos, de vicariance ¹⁶ et de simplexité ¹⁷.

- La vicariance, chez Alain Berthoz, désigne la capacité du cerveau à compenser ou à remplacer une fonction défaillante par une autre, voire à utiliser plusieurs stratégies différentes pour atteindre un même but. Par exemple, quand on tâtonne dans le noir, l'audition et le toucher prennent le relai de la vision, ou lorsqu'un accident rend un sens inutilisable, d'autres modalités sensorielles et cognitives se mobilisent pour maintenir l'action et la perception. Dans le domaine du mouvement, on parle de vicariance fonctionnelle pour souligner que chaque individu dispose d'un répertoire de solutions diverses pour remplir une même fonction motrice. Selon la tâche, le contexte ou la constitution génétique, le cerveau sélectionne la stratégie la mieux adaptée, assurant flexibilité et robustesse face aux perturbations internes ou externes.
- La simplexité est la propriété fondamentale du vivant consistant à trouver des solutions qui, malgré la complexité des processus naturels, produisent des actions d'apparence très simples, rapides et efficaces. Ces solutions ne sont ni des caricatures ni des raccourcis, mais de nouveaux savoir-faire qui intègrent l'expérience passée et anticipent l'avenir pour préparer l'acte et en projeter les conséquences. Ces processus reposent souvent sur un petit nombre de « motifs » ou de lois (par exemple, minimisation d'énergie ou règles de filtrage attentionnel) et peuvent nécessiter quelques « détours » pour aboutir à une réponse optimale. Au final, la simplexité permet au cerveau d'agir avec élégance, rapidité et fiabilité, tout en maîtrisant l'énorme complexité de l'organisme et de son environnement.

5. Directives pratiques pour les mouvements.

Les deux approches étudiées adoptent des points de vue différents : la théorie de Hanna est prescriptive ¹⁸, tandis que celle de Berthoz est descriptive.

¹⁵ Les variations d'accélération portent techniquement le nom de « jerk » ; nous reviendrons plus tard sur cette notion.

¹⁶ Le mot « vicariance » vient du latin « *vicarius* » qui signifie « remplaçant » ou « suppléant ».

¹⁷ Le terme « simplexité » est un néologisme formé en rassemblant des parties des deux mots « simplicité » et « complexité ».

¹⁸ Une analyse prescriptive est une méthode qui, en s'appuyant sur des données, vise à identifier la voie à suivre idéale ou l'action nécessaire pour un scénario particulier.

Plus précisément, Hanna propose une méthode pédagogique qui recommande clairement des mouvements *simples, lents et fluides* pour réapprendre à relâcher et à ressentir son corps et ses mouvements.

Quant à Berthoz, il élabore une théorie neuroscientifique qui décrit comment tout mouvement est naturellement *sans à-coups* et optimal, sans pour autant prescrire un niveau de complexité ou de lenteur.

Ainsi, les objectifs et les niveaux d'intervention des deux théories diffèrent. Hanna agit *localement* sur la plasticité musculaire et neurologique lors d'exercices précis, tandis que Berthoz explique *globalement* l'organisation du contrôle moteur et perceptif au sein du cerveau, valables pour tous les types de mouvements (rapides, lents, simples ou complexes). En fait, la théorie somatique de Hanna *favorise* explicitement l'usage de mouvements simples, lents et fluides en éducation somatique, tandis que la théorie de Berthoz *explique* pourquoi et comment le cerveau produit des trajectoires lentes et sans à-coups, indépendamment de tout enseignement spécifique.

Mais, finalement, les deux théories considérées convergent vers des mêmes conclusions. Elles fournissent en effet des indications communes sur les propriétés que devraient avoir, pour bien faire, des mouvements exécutés en éducation somatique.

Trois propriétés sont fondamentales ; approfondissons-les quelque peu :

- A. Les mouvements sont avant simples ou, à défaut, exécutés simplement en vertu du principe de simplicité présenté ci-dessus. En effet, en éducation somatique, on cherche avant tout à simplifier la tâche du système nerveux en proposant des mouvements efficaces, confortables et immédiatement accessibles.

Thomas Hanna et Alain Berthoz, chacun à leur façon, montrent que nos systèmes neuromoteurs fonctionnent plus aisément quand on part de formes motrices «élémentaires».

Or, il est bien connu que la droite et le cercle sont les figures les plus élémentaires (et aussi probablement les plus 'riches') étudiées par la géométrie classique. C'est pourquoi, ces figures géométriques de base sont privilégiées en éducation somatique. De fait, Thomas Hanna propose des gestes dont la forme géométrique est si simple qu'ils facilitent l'apprentissage et la réorganisation motrice. Pour lui, les trajectoires des mouvements doivent être formées de figures élémentaires, c'est-à-dire principalement composées de lignes droites et de cercles bien agencés ; le cerveau les identifie plus vite et les reconstruit plus facilement. De plus, en les adoptant, il y a économie d'effort: en limitant les changements de direction brusques ou les formes complexes, on évite les contractions superflues et on relâche les tensions chroniques. Par exemple, la pandiculation de Hanna (élever le bras en demi-cercle, s'étirer, puis redescendre en douceur) réapprend au cerveau à dérouler l'articulation de l'épaule sans forcer la scapula¹⁹.

Par ailleurs, Alain Berthoz a mis en lumière que notre système, mu par le principe d'«action minimale », choisit spontanément les trajectoires qui nécessitent le moins d'énergie et de corrections. Dès lors, est adopté le principe du moindre effort : les

¹⁹ La scapula est aussi appelée l'omoplate. Il s'agit d'un os de la ceinture scapulaire jouant un rôle capital dans les mouvements de l'épaule et du bras.

droites et arcs de cercle permettent des commandes motrices constantes (accélération uniforme, vitesse quasi constante), réduisant les besoins de régulation. Au surplus, lorsque la trajectoire est simple, le cerveau peut anticiper les retours proprioceptifs, limitant les écarts et l'instabilité. Par ailleurs, le système nerveux central disposerait d'un répertoire de « modules » (primitives) basés sur ces formes simples, qu'il combine pour générer des gestes variés. Par exemple, en poursuite visuelle, l'œil suit un point en décrivant des arcs de cercle quasi parfaits ; ce mouvement circulaire minimise l'écart entre commande oculomotrice et retour visuel.

Voici quelques exemples pratiques illustrant ceci :

<u>Méthode ou posture</u>	<u>Trajectoire</u>	<u>Objectif somatique</u>
Rotation de la tête assise	Cercle autour de l'axe vertical	Relâcher les tensions cervicales et recalibrer l'orientation spatiale
Linéarité du bras levé	Ligne droite en abduction ²⁰	Apprendre l'élévation scapulaire sans compensation par le trapèze
Flexion latérale du tronc	Arc de cercle sagittal ²¹	Mobiliser en douceur chaque segment vertébral

Ainsi, concrètement, la simplicité des mouvements présente pour le pratiquant des avantages indéniables :

- clarté corporelle : en se concentrant sur une forme géométrique élémentaire, on réapprend à sentir chaque degré de liberté de son articulation ;
- autonomie et sécurité : on peut pratiquer seul, sans craindre de mauvais enchaînements, car la trajectoire simple n'invite pas l'excès ;
- transversalité : ces principes s'appliquent aussi bien à la danse, au sport, qu'aux activités quotidiennes (porter un objet, se pencher, etc.) ;
- rapidité : la simplicité des mouvements rend la pratique somatique à la fois plus rapide à assimiler et plus durable. Ils révèlent que la simplicité géométrique est le fondement d'un apprentissage moteur optimal ;
- variété : on peut combiner à volonté droites et cercles (par exemple, pour former, un S ou un 8) ; ainsi, on peut renouveler aisément la palette motrice sans complexifier la structure de base.

Si les avantages de pratiquer des mouvements rectilignes (ou quasi linéaires) semblent faciles à concevoir, puisqu'il est bien connu que le trajet minimum entre deux points fixes se fait en ligne droite, il est peut-être moins évident d'expliquer l'importance et l'abondance des trajectoires circulaires. La raison principale provient du fait que les mouvements circulaires en éducation somatique exploitent des propriétés mathématiques

²⁰ Mouvement qui écarte un membre ou un segment de membre du plan médian du corps (opposé à adduction).

²¹ Plan vertical perpendiculaire au plan de face.

du cercle qui enrichissent la perception corporelle, la fluidité, et l'efficacité gestuelle.

Voici huit principes qui se glissent derrière ces gestes en apparence simples :

a. Continuité et absence de rupture :

- le cercle est une courbe continue et lisse, sans points anguleux, ce qui soutient des mouvements fluides et ininterrompus ;
- cela favorise le relâchement musculaire et l'exploration de transitions subtiles entre les directions.

b. Symétrie et équidistance :

- Tous les points du cercle sont à distance égale du centre : cela invite à un mouvement équilibré, centré, souvent utilisé pour recalibrer la posture ou développer la conscience du « centre corporel » ;
- on peut jouer avec des rayons, des arcs ou des tangentes pour explorer les variations autour de ce centre.

c. Rotation et spirale :

- les cercles permettent d'introduire des rotations douces, qui stimulent les chaînes musculaires croisées et favorisent une coordination globale ;
- en combinant plusieurs cercles, on génère des mouvements spiralés, très présents en techniques comme Feldenkrais ou Body-Mind Centering (voir [1]).

d. Angles dynamiques et tangentes :

- en mouvement circulaire, les notions de tangente, angle d'incidence, ou de vitesse angulaire deviennent corporelles : ces notions expliquent, par exemple, comment le corps s'oriente, débute ou freine un geste.

e. Conservation de l'énergie :

- les cercles sont très efficaces énergétiquement : leur forme permet de recycler l'élan, idéal pour encourager des gestes économes et fluides, sans tension excessive.

f. Périodicité dans une surface minimale :

- le cercle permet un déplacement infini (mouvement cyclique) tout en restant contenu dans une surface réduite²² — une économie d'espace alliée à une richesse de mouvement ;
- cette densité d'exploration est précieuse dans un contexte somatique : elle permet d'accéder à une vaste palette de sensations et de directions sans changer de place, favorisant la proprioception fine.

g. Temps et rythme incarnés :

- le caractère périodique du cercle invite à ressentir le rythme corporel, à explorer les cycles internes (respiration, battements, impulsions) ;
- cela peut évoquer des notions comme l'éternel retour, très utilisées en danse ou en méditation en mouvement.

h. Circuit et intégration :

- le corps, en parcourant un cercle, peut « boucler » un geste ou une intention, générant une intégration somatique profonde ;

²² Mathématiquement, un cercle minimise la région qu'il entoure parmi toutes les formes avec le même périmètre.

➤ le fait de revenir constamment à un point proche du départ donne au système nerveux un repère stable, tout en favorisant des micro-variations perceptives à chaque passage. En résumé, le cercle sert de guide invisible. Il structure sans figer, propose des directions sans imposer, et donne une architecture douce aux explorations corporelles. De plus, le cercle est un outil de parcours infini dans un espace défini, idéal pour affiner la sensibilité, découvrir des nuances insoupçonnées et cultiver un mouvement cyclique, vivant et intelligent.

- B. L'exécution des mouvements doit être lente. En effet, exécuter les mouvements à basse vitesse permet au système nerveux d'engager un apprentissage actif et conscient. La lenteur amplifie la rétroaction proprioceptive et tactile, ce qui favorise la prise de conscience des tensions chroniques et des schémas musculaires établis. En ralentissant, on donne au cortex sensorimoteur le temps de recalibrer précisément chaque groupe musculaire, d'étendre la "zone homuncule"²³ et de rétablir une coordination fine entre intention et action.

Thomas Hanna considère le mouvement lent comme la clé d'une rééducation neuromusculaire durable. Notre système nerveux apprend les choses lentement et activement. Seuls des mouvements simples, très lents et soigneusement ressentis peuvent inverser des schémas réflexes profonds, réduire la contraction chronique et recréer des cartes motrices plus efficaces.

Alain Berthoz, quant à lui, a montré que le cerveau privilégie les commandes motrices qui minimisent l'effort et l'erreur de prédiction. À vitesse réduite, la boucle sensorimotrice peut fonctionner en quasi-continuité : l'écart entre la commande (planifiée) et la perception (retour proprioceptif, vestibulaire, visuel) reste minime. Cette dynamique facilite la stabilisation des trajectoires et optimise l'intégration des informations sensorielles pour des mouvements plus stables et plus efficaces.

Voici quelques exemples concrets illustratifs :

- pandiculation de l'épaule : lever lent du bras en demi-cercle, maintien bref et redescende tout aussi lente, pour relâcher trapèze et deltoïde ;
- flexion latérale du tronc : glisser doucement en arc de cercle, segment par segment, pour redécouvrir l'articulation vertébrale et le fascia latéral ;
- rotation cervicale : tourner la tête très lentement autour de l'axe vertical, en observant chaque degré de tension et de relâchement.

Au surplus, rappelons que les mouvements lents fondent la pratique somatique sur la qualité de la sensation plutôt que sur la performance, permettant une prise en charge autonome et sécurisée du schéma corporel.

On pourrait légitimement se demander quand un mouvement est lent ou rapide. Il n'est pas possible de fournir une réponse précise à cette question, car l'idée de lenteur est subjective : quelqu'un peut penser effectuer un mouvement lent, tandis qu'une autre personne juge ce même mouvement plutôt rapide. De façon pragmatique, on peut utilement recommander

²³ En neurosciences, un homuncule est une représentation graphique du corps humain, qui montre l'organisation fonctionnelle du cortex cérébral, tant pour les fonctions motrices que sensitives. En d'autres termes, il s'agit d'une carte qui indique quelles parties du cortex cérébral sont responsables de la perception ou du contrôle des différentes parties du corps.

d'aligner les mouvements sur la respiration qui est propre évidemment au pratiquant. Voici deux exemples emblématiques illustrant ces considérations.

- Il est connu que la marche afghane est particulièrement efficace, économe, naturelle et même régénératrice (voir [11]). Dans une variante simple ²⁴, marche et respiration doivent être synchronisées de la manière suivante : on inspire (par le nez) sur les trois premiers pas, puis on garde l'air dans les poumons sur le pas suivant (c'est donc une apnée à poumons pleins), ensuite, on expire (toujours par le nez) sur les trois pas suivants, avant de bloquer encore une fois l'air dans les poumons (il s'agit cette fois d'une apnée à poumons vides), avant de recommencer le cycle complet de huit pas.
- En Qi Gong, de nombreux exercices s'effectuent, très schématiquement, en deux phases : partant d'une position initiale bien déterminée, on s'écarte de cette position au repos sur une expiration, puis, dans un deuxième temps, on revient posément à la situation de départ sur une inspiration. D'une manière générale, les mouvements de flexion, de repli et de tassement des membres et du tronc ont pour effet d'accueillir de l'énergie dans le corps et sont exécutés pendant une inspiration ; par contre, les mouvements d'extension, d'ouverture, d'épanouissement ont pour effet d'expulser l'énergie du corps et sont réalisés pendant une expiration. Par exemple, les célèbres exercices appelés les « huit pièces de brocart » (voir [9]) illustrent très bien ce qui précède.

- C. Les mouvements doivent être fluides et sans à-coups, les deux propriétés étant souvent associées en éducation somatique car elles sont assez proches et complémentaires. Le mot « fluide » vient du latin « *fluidus* », lui-même dérivé du verbe « *fluere* » qui signifie « couler ». En physique, un fluide est une substance qui peut s'écouler ou épouser la forme de son contenant, comme les liquides ou les gaz. En un sens figuré, le terme « fluide » peut donc qualifier un mouvement qui 'coule facilement', effectué sans obstacle, de façon naturelle et relâchée, apparemment sans gros effort. En mécanique, un « à-coup », également nommé « saccade » ou « secousse », est une brusque variation de l'accélération, sans notion de choc. Un mouvement sans à-coups fait référence à un mouvement continu, sans blocages soudains et saccadés. Un mouvement fluide et sans à-coups désigne donc un geste continu, sans changement brusque de direction ou de vitesse. Il se caractérise par une absence de saccades et est souvent associé à l'harmonie et à l'efficacité ; il est aussi souvent jugé esthétique et peut s'apparenter, dans certains cas, à de la danse gracieuse.

En éducation somatique, on cherche à rétablir la connexion fine entre le cerveau et le corps. Les théories de Thomas Hanna et d'Alain Berthoz convergent pour recommander des mouvements continus, dénués de secousses, afin de maximiser la rééducation sensorimotrice et optimiser les trajectoires motrices.

En effet, pour rappel, Thomas Hanna met en évidence le concept d'amnésie sensorimotrice : le cerveau oublie progressivement comment relâcher les muscles, maintenant une contraction chronique perçue comme « normale ». Pour rompre ce schéma appris, il faut engager un

²⁴ Il existe bien d'autres cadences s'adaptant à des contextes variés et pouvant viser des objectifs variables (voir [11]).

apprentissage actif, qui s'appuie sur des mouvements lents, simples et conscients, ce qui peut être réalisé par des exercices de pandiculation. De fait, les mouvements brusques ou heurtés déclenchent automatiquement des réflexes myotatiques²⁵ et de protection qui prolongent la tension et entretiennent l'amnésie sensorimotrice. Des trajectoires douces préservent la voie interne et n'engendrent pas de réactions réflexes intempestives.

Par ailleurs, rappelons qu'Alain Berthoz a montré que le système nerveux central planifie les mouvements selon le principe de moindre effort et en minimisant le « jerk » (la dérivée de l'accélération²⁶). Les trajectoires lisses :

- réduisent les erreurs de prédiction sensorielle ;
- diminuent la charge énergétique ;
- facilitent la cohérence entre commandes motrices et retours proprioceptifs.

Ainsi, prescrire des mouvements fluides s'aligne sur la stratégie naturelle du cerveau pour générer des gestes économiques et précis.

En résumé, en combinant le ré-apprentissage de la relaxation musculaire selon Hanna et l'optimisation des trajectoires de Berthoz, l'éducation somatique privilégie des mouvements fluides et sans à-coups pour :

- rétablir un tonus juste,
- désactiver les réflexes protecteurs,
- aligner mouvement et perception selon les lois neuro-motrices.

En plus des trois propriétés fondamentales des mouvements corporels prônés en éducation somatique – pour rappel, la simplicité, la lenteur, la fluidité – il convient de signaler d'autres caractéristiques que le pratiquant devrait rechercher.

Comme un objectif primordial consiste en l'exploration des mouvements et des possibilités, la pratique doit se faire sans jugement, en accueillant avec bienveillance toute expérience nouvelle, ce qui est notamment réalisé par de la méditation de pleine conscience (*mindfulness* en anglais). Il importe également que chaque mouvement soit exécuté avec une intention claire, qu'il s'agisse de prendre conscience d'une zone du corps, de libérer des tensions, ou d'explorer de nouvelles possibilités de mouvements. Le côté intentionnel est donc fort important, d'un point de vue psychologique, pour viser une efficacité meilleure.

Par ailleurs, il n'est pas inutile de signaler que les exercices choisis doivent être de préférence variés, car la variété des mouvements n'est pas juste un principe esthétique : elle est au cœur du processus d'apprentissage corporel et de transformation sensorimotrice. Voici quatre motifs expliquant pourquoi des mouvements variés doivent être privilégiés :

a) Éveil sensoriel et neuroplasticité :

- la variété stimule le système nerveux, éveillant les capteurs sensoriels et favorisant la neuroplasticité — c'est-à-dire la capacité du cerveau à se réorganiser ;
- chaque mouvement nouveau crée des connexions inédites, améliorant la conscience corporelle et l'adaptabilité.

b) Éviter les automatismes et l'usure :

- répéter toujours les mêmes gestes peut mener à des mécanismes automatiques et à des tensions chroniques ;

²⁵ Pour rappel, un réflexe myotatique, également appelé réflexe d'étirement, est une contraction involontaire d'un muscle en réponse à son propre étirement.

²⁶ Nous reviendrons ultérieurement sur cette notion.

- varier permet de réduire les risques de blessures dues à une surutilisation et d'explorer des zones du corps souvent négligées.

c) Créativité et liberté corporelle :

- en explorant différents gestes, amplitudes, rythmes et directions, on développe une présence corporelle plus nuancée ;
- cela ouvre la voie à une expression plus libre et créative, dans laquelle le mouvement devient un langage subtil.

d) Réintégration globale du schéma corporel :

- la diversité de mouvements réinforme le schéma corporel, c'est-à-dire la représentation interne du corps dans l'espace ;
- cela permet une meilleure intégration des sensations, des émotions et des perceptions spatiales.

En résumé, la variation est une porte d'entrée vers un corps plus conscient, agile et vivant.

6. Modélisations mathématiques élémentaires

Selon le mathématicien belge Jean Mawhin ²⁷, « la modélisation mathématique est un art difficile, proche peut-être de celui du caricaturiste. Il faut obtenir un maximum de ressemblance en un minimum de traits. Il faut savoir négliger a priori ce qui sera a posteriori négligeable ».

D'une manière caricaturale, et en accord avec la citation précédente, nous allons assimiler le corps humain (ou une de ses parties) à un point matériel, c'est-à-dire, selon les conventions classiques de la physique, à un point géométrique (situé dans l'espace au sein duquel nous vivons) auquel est associée une masse, notée m : le point peut représenter, par exemple, le centre de gravité du corps ou une extrémité d'un membre, tandis que la masse est celle du corps entier ou de la partie en mouvement en question.

Le point considéré se déplace au cours du temps, la variable temporelle, notée t , peut varier d'un instant initial ($t = 0$) à un instant terminal ($t = T$). A tout instant t compris dans l'intervalle de temps $I = [0, T]$, le point peut être repéré (dans un référentiel classique) par ses trois coordonnées habituelles : l'abscisse $x(t)$, l'ordonnée $y(t)$ et la hauteur $z(t)$.

Par simplicité, nous nous contenterons d'examiner uniquement comment l'abscisse du point varie au cours du temps ; le cas des deux autres coordonnées pourrait faire l'objet d'une étude similaire.

D'un point de vue mathématique, il s'agit donc d'étudier la fonction $x : t \rightarrow x(t)$. Celle-ci sera supposée continue sur I et même autant de fois dérivable que nécessaire pour nos besoins.

Plusieurs modèles élémentaires sont étudiés en physique classique.

Le plus simple est un mouvement rectiligne uniforme (MRU) : il s'agit d'un mouvement dans lequel le point matériel se déplace en ligne droite à vitesse constante. Mathématiquement, la position du mobile à l'instant t obéit à l'équation différentielle (du premier ordre) suivante :

$\frac{dx}{dt} = v$ avec la condition initiale $x(0) = x_0$; elle est donc donnée, grâce à une simple intégration, par la formule : $x(t) = x_0 + vt$; cette dernière est aussi la vitesse moyenne sur

²⁷ Cette citation est extraite de l'ouvrage [2].

n'importe quel intervalle de temps de durée Δt ainsi que la vitesse instantanée (c'est-à-dire, mathématiquement, la valeur de la dérivée de la fonction x introduite ci-dessus) : on a en effet, avec des notations classiques : $v = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$. On obtient aisément un élément de justification pour la recommandation d'exécuter, en éducation somatique, des mouvements lents : ces derniers sont moins énergivores, et donc réclament un effort ²⁸ moindre, puisque leur énergie cinétique ²⁹ est bien plus faible que celle des mouvements rapides. Par exemple, il est bien connu qu'une marche rapide demande plus d'effort qu'une marche lente ; par exemple, une marche à la vitesse de 10 km/h possède une énergie cinétique quatre fois plus grande qu'une marche à du 5 km/h.

Bien entendu, ce modèle ne correspond pas à la réalité puisque tout mouvement part d'une position de repos ; la vitesse n'est donc pas constante, mais varie au cours du temps. Il faut tenir compte de la dérivée de la vitesse, donc faire appel à la dérivée deuxième de la fonction position ; celle-ci est appelée l'accélération du mobile. Pour un modèle classique de la physique, on peut supposer celle-ci constante, égale à a , ce qui donne lieu à ce que l'on appelle le mouvement rectiligne uniformément accéléré, souvent désigné par les lettres

MRUA, qui est régi par l'équation différentielle (du deuxième ordre) suivante : $\frac{d^2x}{dt^2} = a$; sa solution avec les deux conditions initiales $x(0) = x_0$ et $v(0) = 0$, est donnée, au prix d'une double intégration, par la formule : $x(t) = x_0 + \frac{1}{2}at^2$. Un exemple emblématique en est donné par la chute libre d'un objet sur le sol. Dans un MRUA, l'effort demandé correspond à la force constante qui provoque l'accélération du point mobile ; cette force est directement liée à l'accélération par la seconde loi de Newton selon laquelle la force est le produit de la masse par l'accélération (en formule, $F = m a$) ; c'est pourquoi, plus l'accélération est importante, plus la force nécessaire pour maintenir le mouvement est grande ; une accélération plus rapide nécessite donc un effort intense pour mieux mobiliser des fibres musculaires et le système nerveux central.

Mais, à nouveau, ce modèle du MRUA, tout comme le MRU, ne correspond pas à la réalité des mouvements en éducation somatique ; en effet, l'accélération ne peut pas être constante, puisque le mouvement démarre par une position de repos.

En conséquence, il convient de tenir compte de la dérivée de l'accélération, c'est-à-dire de la dérivée troisième de la fonction position. Cette dérivée troisième est appelée en français un « à-coup » ou encore une « saccade » ou même un « coup de fouet », mais est mieux connue sous son appellation anglaise de « *jerk* » ; elle est donnée, au temps t , par l'égalité suivante :

$j(t) = \frac{da(t)}{dt} = \frac{d^3x(t)}{dt^3}$. Lorsque le jerk est constant, égal à j , on dispose donc de l'équation

différentielle (du troisième ordre) suivante : $\frac{d^3x}{dt^3} = j$; en admettant les trois conditions initiales naturelles, à savoir $x(0) = x_0$ et $v(0) = 0$ et $a(0) = 0$, on obtient, à l'aide d'une triple intégration, l'équation du mouvement étudié, soit $x(t) = x_0 + \frac{1}{6}j t^3$. Ce modèle décrit

²⁸ L'énergie est la capacité à accomplir un travail, tandis que l'effort est la manifestation de cette capacité, souvent associée à une dépense physique ou mentale.

²⁹ Pour rappel, l'énergie cinétique est proportionnelle à la masse et au carré de la vitesse ; en formule, elle est égale à $E_c = \frac{1}{2}mv^2$.

le mouvement que l'on pourrait appeler de « mouvement rectiligne uniformément saccadé » (MRUS), bien que cette appellation ne soit pas standard en physique et qu'on lui préfère le nom de « mouvement à jerk constant ». Celui-ci évoque un système dont l'accélération varie de façon linéaire. Quelques exemples concrets peuvent illustrer ce concept :

- une voiture qui commence à accélérer de plus en plus vite, mais de façon parfaitement régulière. Par exemple, elle augmente son accélération de 1 m/s^2 chaque seconde ;
- en robotique, lors de la construction de robots, on s'y réfère pour éviter les à-coups et préserver les mécanismes ;
- en ingénierie ferroviaire, on y est attentif pour le confort des passagers lors des démarrages ou freinages ;
- en éducation somatique, le concept se traduit par la progressivité du mouvement et l'absence de rupture ou de tension brusque dans le geste. Par exemple, en méthode Feldenkrais ou en technique Alexander, on cherche à créer des mouvements fluides, dont les transitions sont progressives, intelligemment dosées, et cohérentes avec l'intention et la respiration. Un mouvement à jerk constant pourrait illustrer un enchaînement graduel, comme le passage du repos à la marche en pleine conscience.

A nouveau, le modèle MRUS n'est pas vraiment réaliste pour la même raison que les MRU et MRU ne le sont pas non plus. Le jerk varie donc au cours du temps, et la fonction correspondante a pour valeur, au temps t , $j(t)$; il convient de la dériver, c'est-à-dire de faire appel à la dérivée quatrième de la fonction position. Le même argument pourrait être répété.

En conséquence, les dérivées successives de la position par rapport au temps décrivent les différents aspects du mouvement d'un corps. Voici un tableau résumant leur appellation en français (parfois en franglais) et en anglais dans les six premiers cas :

Ordre de la dérivée	Nom en français (ou franglais)	Nom en anglais	Description
Dérivée première	Vitesse	<i>Velocity</i>	Variation de la position dans le temps
Dérivée deuxième	Accélération	<i>Acceleration</i>	Variation de la vitesse dans le temps
Dérivée troisième	Jerk ou secousse ou à-coup ou coup de fouet	<i>Jerk</i>	Variation de l'accélération dans le temps
Dérivée quatrième	Snap	<i>Snap</i>	Variation du jerk dans le temps
Dérivée cinquième	Crackle	<i>Crackle</i>	Variation du snap dans le temps
Dérivée sixième	Pop ou jerk du jerk	<i>Pop</i>	Variation du crackle dans le temps

Il est à noter que les trois premières dérivées (vitesse, accélération, jerk) sont les plus utilisées en pratique et que, au-delà du jerk, les noms deviennent plus anecdotiques et ne sont utilisés que rarement dans des simulations très précises ou des études théoriques élaborées.

L'équation mathématique des modèles MRU, MRUA et MRUS fait penser aux premiers termes de la formule mathématique classique de Mac Laurin appliquée à la fonction position. Plus généralement, cette fonction x admet (bien entendu sous réserve des hypothèses d'application) un développement de Taylor, qui peut s'écrire pour tout instant t voisin d'un instant t^* fixé :

$$x(t) = x(t^*) + v(t^*)(t - t^*) + \frac{1}{2}a(t^*)(t - t^*)^2 + \frac{1}{6}j(t^*)(t - t^*)^3 + \dots$$

Ce développement fait appel à une série ³⁰ dont le terme général est de la forme suivante : $\frac{1}{n!} \frac{d^n x(t^*)}{dt^n} (t - t^*)^n$. Mais, en pratique, le reste, dit de Lagrange et représenté par les trois points en fin de formule, est souvent négligé (car il est généralement très petit par rapport aux premiers termes du développement). Ainsi, on ne tient souvent compte que des premières dérivées de la fonction x .

En éducation somatique, on l'a vu, le jerk joue un rôle essentiel. En fait, pour obtenir des mouvements idéaux, on s'efforce d'affiner la qualité du mouvement, notamment en visant des trajectoires corporelles qui respectent les principes naturels du corps, et, à cet effet, le principe essentiel est la minimisation du "jerk" global, puisqu'un jerk élevé signifie des variations brusques dans l'accélération, ce qui peut rendre le mouvement saccadé, inefficace ou peu harmonieux. On cherche dès lors à minimiser tout le jerk, parce que :

- cela produit un mouvement plus fluide, plus confortable, et plus naturel ;
- le système nerveux et la musculature réagissent mieux à des changements progressifs ;
- on cherche aussi à économiser de l'énergie et à réduire l'usure des tissus ou des muscles.

L'idée est donc de choisir une trajectoire $x(t)$ qui minimise la fonction suivante qui traduit mathématiquement la somme (en fait il s'agit d'une intégrale puisque, intuitivement, on additionne une infinité de cas variant continûment) dont les termes se réfèrent aux jerks instantanés ; mais il convient de débarrasser les jerks de leurs signes, afin que, par exemple, des termes positifs ne viennent pas compenser des négatifs ; c'est pourquoi on élève les jerks au carré (il est à noter que l'on pourrait faire appel à la valeur absolue du jerk, mais on en prend le carré afin de conserver la propriété de dérivabilité de l'expression à intégrer). Au total, on construit l'expression suivante :

$$J = \int_0^T \left(\frac{d^3 x(t)}{dt^3} \right)^2 dt$$

Cette intégrale J mesure le jerk total sur la durée du mouvement. Ainsi, en minimisant cette quantité, on cherche la trajectoire dont les changements d'accélération sont les plus doux possibles.

Notons d'emblée trois applications concrètes de cette règle de minimisation de J :

- cette approche est en accord avec des techniques comme la méthode Feldenkrais ou la Technique Alexander qui encouragent la conscience et l'économie de mouvement ;
- les trajectoires minimisant le jerk sont proches des trajectoires observées en mouvement spontané ou réflexe, comme dans le geste de la marche ou du relâchement musculaire ;

³⁰ C'est une somme pouvant comprendre une infinité de termes.

- pour donner une visualisation simple d'un mouvement somatique qui suit le principe de minimisation du jerk, on peut imaginer un geste quotidien, par exemple lever le bras en douceur devant soi. Le contexte est le suivant : on est assis ou debout, et on veut lever un bras horizontalement jusqu'à hauteur de l'épaule. Alors que pour un mouvement classique (non optimisé), on lève son bras rapidement, sans trop penser au chemin qu'il prend ; cela peut créer des accélérations soudaines, surtout au début et à la fin du mouvement, et aussi cela oblige le corps à compenser par des tensions musculaires, ce qui le fatigue inutilement. Par contre, pour un mouvement somatique avec minimisation du jerk, on peut procéder comme suit : on commence lentement, presque imperceptiblement, puis le mouvement s'accélère progressivement, atteint un rythme fluide, avant de ralentir doucement vers la fin. De la sorte, il n'y a aucun à-coup et on a l'impression que le mouvement glisse comme une plume poussée par le vent et, par ailleurs, le bras suit une courbe naturelle qui permet de minimiser le jerk total dans le temps.

Mathématiquement, pour trouver un « bon » mouvement, il s'agit de trouver une fonction inconnue x donnant la trajectoire du point considéré au cours du temps t variant dans l'intervalle I de sorte que l'intégrale J définissant le jerk total soit minimum. On peut résoudre ce problème fonctionnel ³¹ par la méthode du calcul des variations dont une solution peut être trouvée en résolvant l'équation dite d'Euler - Lagrange (généralisée pour une dérivée troisième) qui découle du principe physique de moindre action ³². Dans le problème de minimisation étudié, l'équation d'Euler - Lagrange peut se mettre sous la forme d'une équation différentielle ordinaire (EDO en abrégé) du sixième ordre ³³, à savoir $\frac{d^6x}{dt^6} = 0$, avec six conditions, dites « initiales », fournies par les valeurs des positions, des vitesses et des accélérations aux deux extrémités de I , soit en 0 et en T . De façon équivalente, on est amené à résoudre le problème mathématique (assez élémentaire) consistant à rechercher une fonction dont le pop (ou jerk du jerk) est nul, ce qui équivaut au caractère constant du crackle (ou dérivée cinquième) Une solution de ce problème est donnée par une fonction appelée « quintique », ou polynôme du cinquième degré, qui peut se mettre sous la forme générale suivante :

$$x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5$$

où les six constantes a_i (pour $i = 0, 1, \dots, 5$) peuvent être déterminées à partir des six conditions initiales. La courbe trouvée est lisse et ressemble un peu à la représentation graphique d'une cubique, mais avec potentiellement plus de changements de direction et des points de rebroussement supplémentaires. Cette solution présente souvent un profil dit « en S prolongé » ; elle permet un contrôle prédictif tout en réduisant les variations rapides de l'accélération.

On pourrait se demander encore pourquoi le corps aime une telle solution mathématique. Voici quelques éléments de réponse à cette interrogation :

³¹ Car l'inconnue est ici une fonction.

³² Principe physique selon lequel la dynamique d'une quantité physique peut se déduire d'une unique grandeur appelée « action », en supposant que les valeurs dynamiques permettent à l'action d'avoir une valeur optimale entre deux instants donnés.

³³ En effet, le jerk fait appel à une dérivée d'ordre 3, et le carré de l'intégrand conduit à l'ordre 6 pour l'EDO.

- les tissus conjonctifs et fuseaux neuromusculaires n'aiment pas les variations brusques d'accélération ; le jerk élevé déclenche des réflexes de protection (raideur) ;
- en abaissant le jerk, on réduit la charge cognitive et proprioceptive : le geste semble plus « léger » et demande moins d'effort conscient ;
- la courbe polynomiale lisse se traduit, pour la personne, en :
 - a) moins de gaspillage d'énergie,
 - b) moins de vibrations articulaires (donc moins de douleur),
 - c) meilleure perception fine, donc apprentissage sensorimoteur plus riche.

7. Conclusion

Ce travail a exploré la convergence entre l'éducation somatique telle que pensée par T. Hanna et les modèles de contrôle moteur de A. Berthoz pour proposer un cadre scientifique et mathématique des mouvements. Nous avons formalisé la notion de « jerk total » et montré, à partir d'analyses de variations, qu'un mouvement minimisant ce critère favorise la fluidité et la clarté proprioceptive. Cette approche rejoint l'idée hannienne de conscience kinesthésique et confirme l'hypothèse berthozienne selon laquelle le système nerveux optimise la trajectoire pour réduire l'effort perceptif.

Cette étude a conduit aux apports et implications suivants :

- la minimisation du jerk total offre un repère quantitatif pour concevoir et évaluer les exercices somatiques ;
- elle permet de rapprocher la pédagogie somatique des protocoles d'ergonomie et de rééducation motrice basés sur le contrôle optimal ;
- les formateurs peuvent calibrer leurs séquences en s'appuyant sur des mesures de lissage cinématique plutôt que sur l'intuition seule.

Ce travail possède des limites et perspectives :

- la modélisation actuelle repose sur des trajectoires univariées et mono-articulaires ; il faudra étendre l'analyse, notamment aux mouvements multi-articulaires et aux chaînes cinétiques complexes ;
- l'impact cognitif et émotionnel de l'optimisation du jerk reste à quantifier via des indicateurs neurologiques ou psychophysiologiques ;
- une validation à grande échelle, intégrant des capteurs inertiels et des retours somatiques subjectifs, renforcera la robustesse du modèle ;
- pour aller plus loin, on pourrait explorer l'intégration de biofeedback en temps réel, l'application de ces principes dans des disciplines voisines (Feldenkrais, Alexander) ou l'usage d'algorithmes d'apprentissage automatique pour personnaliser les trajectoires optimales.

En définitive, en recommandant des mouvements à jerk total minimal, on crée un pont tangible entre théorie et pratique en éducation somatique. Cette conclusion invite à repenser les protocoles d'apprentissage moteur en alliant sensibilité corporelle et rigueur mathématique, pour favoriser un geste à la fois souple, efficace et porteur de conscience.

Bibliographie

- [1] Bair J., *En quête de bien-être psychosomatique. Balade, en compagnie d'une IA, dans l'éducation somatique*. Document de travail, Liège, 2025, 141 pages.
- [2] Bair J. – Crama Y. – Henry V. – Justens D., *Modèles mathématiques en gestion*, Collection L, éditeur Cassini – Pole, Paris, 2011, 297 pages.
- [3] Berthoz A., *Le sens du mouvement*, Odile Jacob, Paris, 1997, 336 pages.
- [4] Berthoz A., *La simplicité*, Odile Jacob, Paris, 2009, 256 pages.
- [5] Berthoz A., *La vicariance. Le cerveau créateur des mondes*, Odile Jacob, Paris, 2013, 190 pages.
- [6] Feldenkrais M., *Energie et bien-être par le mouvement. Les fondements de la méthode Feldenkrais*, Dangles éditions, Escalquens (France), 1993, 211 pages.
- [7] Hanna T., *Somatics : Reawakening the Mind's Control of Movement, Flexibly and Health*, Editor De Capo, Boston, 2004, 162 pages.
- [8] Hanna T., *Le mythe du vieillissement. Les trois réflexes de stress et l'amnésie sensorimotrice*, Editions Ressources Primordiales, Caen, 2020, 230 pages.
- [9] Réquéna Y., *A la découverte du Qi Gong*, Guy Trédaniel éditeur, Paris, 2011, 206 pages.
- [10] Searly J., *La Technique Alexander*, Evergreen, Köln, 2007, 128 pages.
- [11] Stiegler E.G., *Régénération par la marche afghane*, Guy Trédaniel éditeur, Paris, 2013, 82 pages.

Adresse électronique de l'auteur : j.bair@uliege.be.