



eJRIEPS

Ejournal de la recherche sur l'intervention en éducation physique et sport

15 | 2008

Varia

La modélisation biomécanique : un outil didactique ?

Guillaume Laffaye



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/ejrieps/5853>

DOI : [10.4000/ejrieps.5853](https://doi.org/10.4000/ejrieps.5853)

ISSN : 2105-0821

Éditeur

ELLIADD

Référence électronique

Guillaume Laffaye, « La modélisation biomécanique : un outil didactique ? », *eJRIEPS* [En ligne], 15 | 2008, mis en ligne le 01 juillet 2008, consulté le 03 mai 2021. URL : <http://journals.openedition.org/ejrieps/5853> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/ejrieps.5853>



La revue *eJRIEPS* est mise à disposition selon les termes de la Creative Commons Attribution 4.0 International License.

La modélisation biomécanique : un outil didactique ?

Guillaume LAFFAYE

Laboratoire contrôle moteur et Perception, UPRES EA 4042

UFR STAPS ORSAY, Université PARIS SUD XI

Résumé

Modéliser, c'est créer artificiellement une ou plusieurs variables, issues d'une démarche théorique visant à remplacer des phénomènes complexes invisibles par des phénomènes simplifiés et visibles. Deux niveaux hiérarchiques de modélisation biomécanique ont pu être dégagés, selon leurs capacités à simplifier la complexité du réel. Le premier niveau est celui de la modélisation intégrative totale, dans lequel le corps humain est réduit à une expression simplifiée, comme dans la modélisation en système masse ressort. Le corps est représenté globalement, et le discours pédagogique utilise des notions telles que l'énergie ou la force comme organisateurs cognitifs. Le deuxième niveau est celui de la modélisation cinématique multi-segmentaire intégrative, où le corps humain est alors considéré comme une entité constitutive de sous-entités dépendantes.

Ceci suggère que la modélisation permet de rationaliser le discours de l'enseignant en utilisant la métaphore comme organisateur cognitif de sa pensée à travers un modèle hiérarchique dans la maîtrise du corps humain. Il permettra la construction de sens chez l'élève, en lui permettant une appropriation du savoir par une construction cognitive et active d'un corps «globalisant et maîtrisable».

Introduction

La modélisation biomécanique a pour but de simplifier des phénomènes complexes, en substituant au système réel une représentation mentale ou physique exprimée sous forme verbale, graphique ou mathématique (Durey, 1997). En ce sens, modéliser, c'est donc créer artificiellement un ou plusieurs paramètres, issus de cette démarche. L'intérêt didactique d'une telle approche est de créer du sens, en focalisant l'intervenant sur les variables essentielles dans l'apprentissage et d'offrir un langage imagé à l'élève pour le focaliser sur les aspects pertinents de la pratique.

L'objectif de cet article est de proposer une métamodélisation des modèles biomécaniques et de leurs conséquences sur l'action didactique. Nous postulons, sur la base notamment des travaux de Cizeron et Gal-Petitfaux (2002), que ces modélisations servent à alimenter les croyances des enseignants, ce qui transpire à travers leurs communications didactiques. Le modèle que nous proposons est un modèle hiérarchique dont la représentation qu'en a l'enseignant sert d'organisateur cognitif pour donner des consignes aux élèves. A chaque niveau du modèle sont donc associés d'une part une représentation fonctionnelle du corps en mouvement et d'autre part un registre langagier particulier utilisé par l'enseignant dans ses consignes.

1. Modélisation biomécanique et contexte didactique

On peut contextualiser le rôle de la modélisation biomécanique dans un contexte épistémologique plus général. En reprenant l'idée de Chaumeil (2000), on peut dire qu'il existe deux dimensions de l'épistémologie : «une dimension de scientificité à visée de conformité et une dimension de nouveauté à visée efficiente». Les trois objectifs de l'Education physique seraient inféodés à une question supérieure, celle du rapport entre l'être pensant et son corps, c'est-à-dire la question de la conscience de l'objet et du lieu de sa finitude. L'éducation physique en ce sens vise à la réconciliation du sujet et de son corps.

Dans cette optique, la question du sens devient fondamentale, Chaumeil précise que le sens de la pratique ne va pas de soi, il est l'objet d'un processus. La modélisation biomécanique participe à ce processus, que l'on peut qualifier de cognitif. Il permet de se mettre en opposition avec une représentation d'un corps fragmenté, fruit d'une sommation d'un nombre de degrés de liberté (d.d.l.) trop nombreux pour être maîtrisés de manière consciente. «Les centaines de d.d.l. qui caractérisent l'organisation anatomique et dynamique du squelette de la plupart des animaux et de l'homme, auraient rendu le contrôle du mouvement impossible si au cours de l'évolution n'étaient apparues des méthodes pour diminuer à la fois le nombre de d.d.l. mécaniques par l'organisation géométrique du squelette, mais aussi le nombre de d.d.l. que le cerveau doit contrôler » (Berthoz, 1997).

Cette idée d'un nombre de d.d.l. trop important renvoie à la construction du rapport au corps chez l'élève. Les approches analytiques de la biomécanique renvoient à une construction cognitive d'un corps morcelé, image peu valorisante dans l'appropriation de son corps en mouvement. A contrario, une approche modélisante de la mécanique dans le sens où nous l'avons définie en introduction, permet au sujet de s'approprier un corps

globalisant et donc maîtrisable. Par exemple, la modélisation du corps humain en système masse-ressort permet de mettre au centre du procès pédagogique la réflexion de l'enfant s'auto-construisant : «je suis un ressort qui rebondit, je vais donc tout mettre en œuvre dans ma motricité pour illustrer cette image». Cette démarche, à notre sens, permet à l'élève de s'approprier un corps globalisant et de se construire une nouvelle dimension corporelle. En effet, la métaphore du ressort offre une finalité dans l'acte moteur dont les moyens doivent être définis par l'élève lui-même. C'est à lui de décider des meilleures modalités pour organiser «son corps rebondissant». Cette démarche intellectuelle lui permet de construire un savoir personnel.

En ce sens, ces connaissances deviennent enactées (Varela, 1993), car elles ont un caractère émergent sur le fond d'un arrière plan de compréhension. Cizeron (1998) précise que la métaphore que peut utiliser un enseignant est forgée dans l'expérience vécue, dans l'intimité corporelle de cette expérience et elle apparaît dès lors comme un organisateur cognitif. Nous entendons par organisateur cognitif l'ensemble des représentations cognitives, conscientes ou non, qui vont organiser les choix de l'enseignant lors de ses communications didactiques. Ces images proposées, fortement intégrées dans l'action et dans le contexte, correspondraient «au langage de la pratique» (Cizeron) un langage correspondant à « la grammaire de la pensée » (Tochon, 1993).

De notre point de vue, ce langage de la pratique serait fortement assujéti aux sciences d'appui de l'activité elle-même. Ainsi, à titre d'illustration, une étude réalisée par Cizeron et Gal-Petitfaux (2002) sur l'enseignement de la gymnastique scolaire montre que si les croyances factuelles relèvent d'ancrages perceptifs, les croyances représentationnelles s'appuient plutôt sur des modélisations constituées d'objets plus ou moins abstraits. Ces objets peuvent être empiriques (rigidifier le corps comme un bâton) ou théoriques (créer un moment cinétique). Dans cette étude, les registres théoriques interrogent tour à tour l'anatomie, la biomécanique ou le domaine perceptif, sans que les enseignants soient forcément capables d'expliquer les liens existant entre ces trois registres.

Ce système de pensée répond à une logique de rationalisation du discours pédagogique, la justification d'une consigne pouvant alors interroger tour à tour tel ou tel registre, indépendamment d'un autre.

La modélisation biomécanique tente de par sa finalité même, de permettre l'imbrication de ses différents registres, en réduisant les d.d.l. du système musculo-squelettique. Elle se place dès lors en haut d'un modèle hiérarchique de construction cognitive du savoir chez l'enseignant. Chaque niveau inférieur au modèle général et global devient alors enjeu d'une recherche cognitive active, réalisée par l'élève dans la construction de la

compréhension de l'image métaphorique supérieure. Ainsi, il s'approprie un savoir par la recherche d'un savoir-faire personnel. A titre d'exemple, lors de la métaphore «rebondis comme un ressort lorsque tu cours», qui consiste à raidir le système musculo-squelettique afin d'optimiser les transferts énergétiques lors du sprint, chaque élève va s'approprier le sens de cette image directement dans son action. Cela pourra être pour untel la recherche d'un temps de contact bref au sol, pour un autre la recherche d'alignement segmentaire ou encore la maîtrise de segments particuliers (genoux, bras...). L'enseignant pourra faciliter la compréhension de l'image supérieure issue du modèle en verbalisant des consignes issues d'un registre inférieur (indicateurs anatomiques, kinesthésiques...). Ainsi, la rationalisation du procès pédagogique chez l'enseignant sera le fruit de connaissances hiérarchisées et dépendantes, à partir d'un modèle supérieur.

Le rôle de la modélisation biomécanique permet donc de créer des liens entre les différents registres que peut interroger l'enseignant dans une compréhension globalisante et hiérarchique de l'action motrice. En outre, il permettra la construction de sens chez l'élève, en lui permettant une appropriation du savoir par une construction cognitive et active d'un corps «globalisant et maîtrisable».

2. Modélisation intégrative totale du corps humain : exemple du système masse ressort

Modéliser, c'est donc créer artificiellement une ou plusieurs variables, issues d'une démarche théorique visant à remplacer des phénomènes complexes invisibles par des phénomènes simplifiés et visibles. Le corps humain en mouvement met en jeu un très grand nombre de degrés de liberté (d.d.l.). L'apprentissage moteur consiste à trouver des stratégies motrices efficaces visant à réduire les d.d.l. pour augmenter le niveau de coordination, diminuer le coût énergétique tout en augmentant le rendement mécanique. Dans un tel contexte, l'enseignant doit faire des choix dans sa communication didactique pour guider l'élève dans ce processus long et complexe. Les consignes que donne un enseignant sont toujours le fruit de son histoire, de ses représentations et des différents creusets théoriques qui le structurent. Ces stratégies sont donc assujetties aux représentations du corps humain ainsi modélisé. La représentation la plus globale consiste à utiliser une modélisation permettant de réduire l'ensemble des d.d.l. du sujet au maximum afin que l'élève ait la vision la plus globale de la motricité à mettre en œuvre dans l'action à réaliser. Ce type de démarche renvoie à ce que nous qualifions de modélisation intégrative totale du corps humain.

Nous allons illustrer cette stratégie à travers la modélisation du corps humain en système masse ressort lors d'activité de saut, en voyant d'abord les connaissances théoriques et les principaux résultats, puis ensuite les conséquences de ce genre d'approche sur l'intervention didactique.

Le corps humain est modélisable sous la forme d'un système masse-ressort simple consistant en un ressort linéaire simple (figure 1), qui représente les membres inférieurs de longueur l sur lequel est posée une masse m qui représente la masse totale du sujet (Laffaye, 2001; Mac Mahon et Cheng, 1990). On peut dès lors calculer la raideur mécanique k qui rend compte de la capacité du système musculo-squelettique à emmagasiner puis restituer de l'énergie élastique.

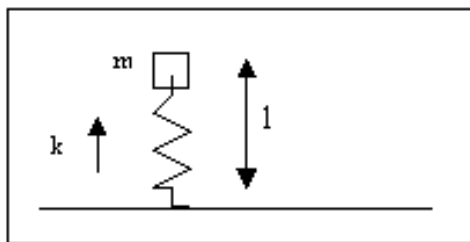


Figure 1. Modélisation du corps humain en système masse ressort simple de longueur l , de masse m et de raideur mécanique k (D'après Laffaye, 2001)

La relation qui existe entre la raideur mécanique et la détente a été étudiée (Laffaye & Bardy, 2005a) à partir d'une population de sauteurs en hauteur de tous niveaux, du débutant au plus haut niveau mondial. Les résultats en termes de détente s'échelonnent de 32 cm à 152 cm. Les résultats montrent une corrélation significative [$r=.90$; $p<.05$] entre la valeur de la raideur et la hauteur du saut (Figure 2). Le modèle de régression reste discriminant des différentes populations, mais pas à l'intérieur d'une même population.

Ces résultats laissent donc à penser qu'il suffit de raidir le système musculo-squelettique pour aller plus haut. Mais quelles sont dès lors les conséquences pour l'intervenant ? L'amélioration de la raideur mécanique passe-t-elle uniquement par l'amélioration des facteurs physiques ? On cherchera dans ce cas à mettre en place des situations dans lesquelles seront développées des contractions musculaires de type pliométrique, avec une recherche systématique d'un temps excentrique court afin d'optimiser le cycle étirement-renvoi. Ou bien l'intentionnalité suffit-elle à influencer la raideur à travers des consignes données ?

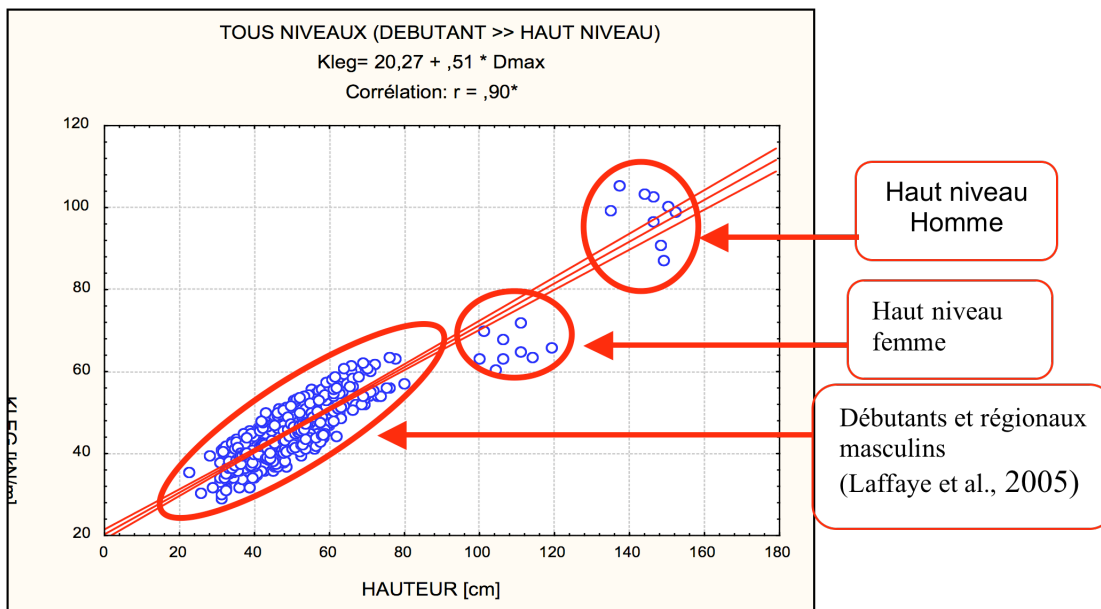


Figure 2. Relation Raideur mécanique (Kleg) et détente chez des sauteurs en hauteur

Cette hypothèse a fait l'objet de deux études originales.

La première (Arampatzis, Schade, Walsh et Brüggerman, 2001) a été réalisée dans une situation de saut de contre-haut (20 et 60 cm) en donnant deux types de consignes :

saute haut avec un temps de contact bref au sol

saute haut avec un temps de contact important au sol.

Les résultats montrent que la diminution du temps de contact augmente les valeurs de la raideur mécanique. En effet, elles passent lors des sauts du contre-haut de 60 cm de 22 kN/m (temps de contact long) à 59 kN/m (temps de contact bref). En outre, cette étude montre que les instructions ne font pas varier la performance verticale.

La seconde (Laffaye, Taiar et Bardy, 2005b) a été réalisée avec des basketteurs dans une situation de contre haut de 30 ou 60 cm selon 3 types d'instructions :

- « saute haut avec une flexion importante des genoux au sol »,
- « saute le plus haut possible »,
- « saute haut avec une flexion réduite des genoux au sol ».

Les résultats montrent que la performance varie très peu avec l'instruction (moyenne 39.2 cm). L'instruction n'influence pas la performance verticale en saut. Ce qui tend à démontrer que l'angle maximum du genou ne contribue pas de manière cruciale à la performance en saut de contre haut.

Cependant, la raideur de la jambe est multipliée par 5 en passant de 7.3 à 36 kN/m. de la consigne flexion maximale à flexion minimale. Ces résultats montrent qu'il est possible de

réaliser une performance similaire avec des valeurs de raideur différentes. Une valeur minimale est cependant nécessaire (7kN/m) pour sauter haut.

Pour conclure sur ces expériences, on peut penser que si les consignes ont permis de changer les valeurs de la raideur, et ce, sans influencer ni positivement ni négativement la performance, c'est qu'une phase d'apprentissage est probablement nécessaire pour permettre un changement perpétuel de la valeur de la raideur naturelle. En effet, partant du constat (différentes études) que la valeur de la raideur mécanique naturelle d'un athlète (en saut et en sprint) est corrélée avec son niveau d'expertise, on peut se poser la question de la part innée et de la part acquise de cette raideur. Nous émettons ici l'hypothèse que les consignes de l'intervenant lors de la phase d'apprentissage permettent d'augmenter plus rapidement la valeur de la raideur. Une étude est en cours pour valider cette hypothèse.

On voit donc que dans cette approche de la modélisation intégrative totale, la réduction drastique des d.d.l. n'en réduit pas pour autant son aspect prédictif (la performance dépend de la raideur mécanique) ni son aspect fonctionnel : la valeur de la raideur donne un indicateur du potentiel de restitution énergétique de l'athlète.

3. Modélisation intégrative dynamique : la signature de l'expertise sportive

Dans cette approche, l'objectif est toujours de réduire au maximum les d.d.l. du corps humain, mais selon une approche dynamique, c'est à dire en partant du postulat que l'ensemble des accélérations est en lien direct avec les forces appliquées. En d'autres termes, l'accès aux forces est une manière de réduire les d.d.l. du système en tant que conséquence de l'ensemble des mouvements réalisés par les différents segments corporels. L'étude des forces, des moments, et de manière plus générale de toutes les variables extraites de courbes de force, intègre de facto tout ce qu'a réalisé le corps humain. Nous allons illustrer cette approche en montrant comment, en étudiant simplement les paramètres issus d'une plate forme de force lors de sauts verticaux, des stratégies motrices complexes ont pu être identifiées et comprises au regard du contexte dans lequel elles ont été réalisées. Ceci sera illustré à travers deux études originales; l'une sur le saut squat, l'autre sur le saut appel un pied.

Lors du saut squat, Kollias, Hatzilaki, Papaiakevou et Giatsis (2001) ont cherché à savoir s'il existait une signature de l'appartenance à une catégorie sportive. Ils ont utilisé pour cela une analyse en composante principale pour mettre en avant les différents profils moteurs des athlètes de différents sports (Athlètes, footballeurs, volleyeurs et handballeurs). Les résultats montrent que 73% de la variance totale est expliquée par

deux facteurs. D'une part, un facteur temporel lie le temps de contact, le temps excentrique et le taux de développement de la force (en valeur négative). D'autre part, un facteur force lie le pic de force et le pic de puissance. Cette étude montre également un profil spécifique à chaque sport : un saut basé sur des temps longs (temps total et excentrique) est spécifique aux volleyeurs ; un saut basé sur des facteurs forces est spécifique aux athlètes. Enfin, un profil intermédiaire caractérise footballeurs et handballeurs.

Lors du saut appel un pied après course d'élan, Laffaye, Bardy & Durey (2007) ont également cherché à savoir si le type d'impulsion lors d'une tâche de saut appel un pied dépendait de l'appartenance à une catégorie sportive. La population était constituée de basketteurs, handballeurs, volleyeurs, sauteurs, et de sportifs non sauteurs.

Les résultats montrent que le modèle trouvé englobe les six variables étudiées et explique 78 % de la variance. Deux composantes expliquent cette variance : une composante temporelle, regroupant temps, temps excentrique et abaissement du centre de gravité et une composante force regroupant pic de force, pic de puissance et taux de développement de la force.

La Figure 3 illustre le modèle et montre les scores factoriels des sujets selon leur appartenance sportive. La composante temporelle est sur l'axe des X, la composante force sur l'axe des Y.

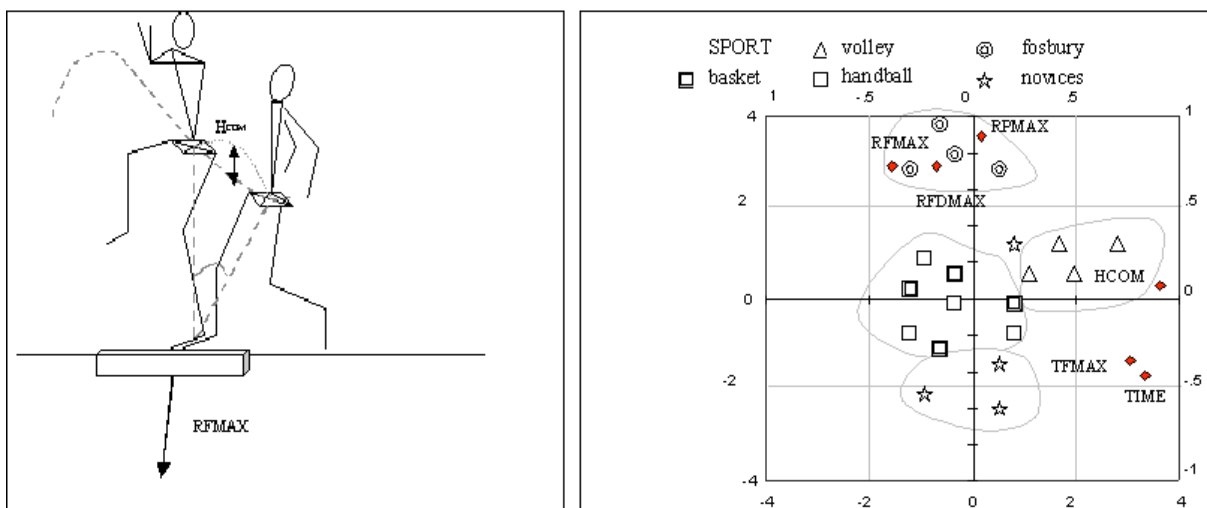


Figure 3. Tâche expérimentale et scores factoriels pour chaque sujet

Trajet du centre de gravité pendant l'impulsion (à gauche). Scores factoriels des variables et des sauteurs (valeur moyenne de 3 sauts) sur les deux composantes principales de l'Analyse en composante principale (composante temporelle en x ; composante force en y). À gauche et en bas figurent les scores individuels, à droite et en haut les scores des

paramètres. Pic de force relatif : RFMAX, pic de puissance relative : RPMAX, taux de développement maximum de la force : RFDMAX, temps d'impulsion : TIME, temps jusqu'au pic de force : TFMAX, abaissement du centre de masse : Hcom. (D'après Laffaye, Bardy & Durey, 2007).

On voit très nettement sur la Figure 3 que les individus sont regroupés par spécialités sportives. Ceci tend en effet à démontrer l'existence d'une signature de l'impulsion. Ainsi, les novices sont regroupés sur l'axe force avec des scores factoriels faibles (-2 et -4 sauf un sujet), montrant une impulsion caractérisée par un niveau de force et de puissance faible. Les Fosburyistes, sont regroupés sur l'axe y de la composante FORCE avec des scores élevés (2.5 et 4) montrant une impulsion avec un pic de force et de puissance important et un taux de développement fort dû à un pic passif brutal (pose violente du talon au sol). Les volleyeurs sont caractérisés par la composante temporelle : une impulsion longue avec une phase excentrique importante et abaissement du centre de masse important. Enfin, les basketteurs et les handballeurs ont un profil mixte, ni exclusivement basé sur la force, ni exclusivement temporel.

Il existe donc une structure de l'impulsion basée sur un facteur temporel et force. Ce modèle montre qu'il est possible de sauter haut avec des stratégies motrices différentes. On peut donc réaliser une performance identique, avec des stratégies qui restent assujetties à une signature dynamique de l'appartenance à une catégorie sportive. Ceci stipule pour l'idée d'une équi-finalité dans des coordinations complexes.

Les modèles trouvés dans ces deux études montrent donc que le type de saut réalisé est assujetti aux contraintes de chaque sport, le volleyeur régule son impulsion en fonction du temps restant avant le contact avec la balle, jouant donc sur le paramètre temps, alors que le sauteur en hauteur peut centrer son appel sur le développement d'une puissance et d'une force maximales dans un temps bref. Enfin, les contraintes liées au contact direct (handball, football et basket) montrent un profil intermédiaire et donc est sujet à régulation différenciée.

Les représentations fonctionnelles qu'alimente cette approche renvoient à une conception dynamique (au sens mécanique de l'étude des forces) du discours didactique, plus particulièrement lors d'activités athlétiques. L'organisateur cognitif de l'enseignant va tourner autour de l'idée que la gestion des forces va permettre de structurer le sens que l'élève va donner à son activité. Les consignes seront dès lors structurées autour de notions de «poussée», de «force», de «temps de contact», «d'impulsion». Cette

représentation renvoie à l'idée d'un «corps globalisant», dans la mesure où l'ensemble du corps doit agir de concert pour répondre aux consignes de l'enseignant.

4. Modélisation cinématique multi segmentaire intégrative

Dans notre essai de catégorisation des modélisations biomécaniques, un niveau hiérarchique inférieur est celui que nous appelons «la modélisation cinématique multisegmentaire intégrative». Il est de niveau inférieur dans la mesure où la réduction des d.d.l. est plus faible, et donc que le caractère simplificateur que doit avoir un modèle est moins important. Le corps humain va être dès lors considéré comme une somme de segments qui doivent agir de manière coordonnée pour réaliser une tâche motrice donnée. Cette approche est dite cinématique, car elle ne s'intéresse qu'aux mouvements et à ses caractéristiques, sans prendre en compte les forces qui en résultent. Le corps est alors conçu comme une entité entière, dans lequel des entités plus petites vont agir ensemble. Cizeron et Gal-Petitfaux (2002) parlent de discrétisation d'unités corporelles en segments et charnières lors de l'enseignement de la gymnastique.

Ce niveau de modélisation focalise l'élève sur les aspects corporels entitaires ou segmentaires qui paraissent les plus pertinents dans la réussite de la tâche. Cela renvoie à l'idée d'une représentation d'un corps «segmenté» ou «fragmenté». Les organisateurs cognitifs de l'enseignant sont du registre de la mécanique analytique, utilisant des notions de positions intersegmentaires (abductions, adductions, flexions, extensions...), d'angles intersegmentaires (plus ou moins ouverts ou fermés...) ou encore de paramètres cinématiques (vitesse, amplitude).

Nous allons illustrer cette modélisation par une étude sur l'influence du rôle des bras chez l'expert et chez le novice en sport de saut, afin de montrer que les sous entités constitutives ont une incidence sur l'ensemble du mouvement corporel et ne peuvent donc être dissociées.

Dans cette étude, huit sujets novices et dix joueurs de volley-ball (de niveau nationale 3) ont participé à une série de 8 sauts de contre-haut avec des mouvements de bras libres et de 8 sauts de contre-haut avec des mouvements de bras restreints avec une hauteur de contre-haut de 30 cm ou 60 cm. Le corps humain est modélisé selon un modèle multisegmentaire bidimensionnel de six segments (pied, jambe, cuisse, tronc, bras, avant-bras) afin de créer le modèle biomécanique fonctionnel final (Figure 4).

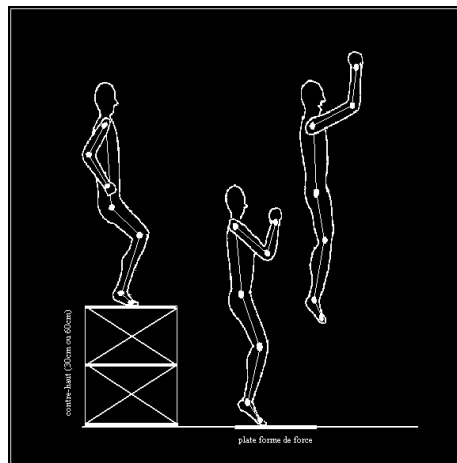


Figure 4. Situation expérimentale du saut de contre-haut. D'après Laffaye, Bardy et Tairar (2006).

Le sujet saute d'une boîte (30cm) ou de deux boîtes (60cm) sur une plate forme de force. Les points sur les articulations représentent les marqueurs permettant de reconstituer une modélisation du corps humain en 6 segments.

Les résultats montrent clairement une différence de comportement entre experts et novices. Tout d'abord, Les experts sautent 15% plus haut dans la condition mouvement de bras libres contre seulement un gain de 12% chez les novices. Les experts sautent en moyenne 8.6% plus haut que les novices. La hauteur du contre-haut contribue à une augmentation notable de la performance de saut vertical pour les experts seulement (+8%).

Une analyse plus fine des deux populations étudiées montre des comportements moteurs différents.

En effet, les novices réduisent le temps d'impulsion de manière notable (-4%) lorsqu'ils utilisent les bras. Le temps excentrique (temps jusqu'au pic de force verticale maximale, correspondant à la phase freinatrice du mouvement) varie très peu avec les deux conditions de bras. Le pic actif de la force de réaction verticale augmente de 4 % avec les mouvements de bras libres alors que le pic passif ne varie pas avec la condition de bras.

Il est enfin remarquable de noter que le temps d'impulsion est plus long chez les experts que chez les novices (+7%) en mouvement de bras libres.

L'analyse du comportement moteur des experts montre une nette optimisation des sorties mécaniques lorsque les bras sont utilisés. En effet, le mouvement des bras augmente le pic actif de la force de 7% chez les experts. Le temps d'impulsion des experts ne change pas entre la condition bras libre ou bras restreint contrairement aux novices.

Chez les experts, il est très curieux de noter que le temps excentrique augmente de plus de 14% avec le mouvement de bras libre, alors qu'il est communément admis que l'expertise est caractérisée par une diminution des phases excentriques du mouvement, afin d'optimiser le cycle raccourcissement-renvoi. Parallèlement à ce constat, le pic passif de la force verticale réduit de 6% lorsque les bras sont utilisés. Les experts utilisent donc le mouvement des bras afin de diminuer le choc de l'impact au sol (pic passif). On peut donc penser que le balancer des bras permet de réduire le choc de l'impact en augmentant la phase excentrique du saut.

L'analyse des moments de force permet de comprendre pourquoi la phase excentrique est plus grande avec les mouvements des bras chez les experts. En effet, les résultats montrent que le moment de force chez les experts est plus grand en condition de bras restreinte (+15%) alors qu'il varie très peu chez les novices. Cette différence montre que le rôle des bras est d'assurer la stabilité du système ainsi que de diminuer l'impact au sol (baisse de 6% du pic passif de force avec les bras). Ceci représente un facteur de performance notable pour l'expert car le sauteur une fois en l'air ne peut modifier le moment angulaire créé à l'impulsion, de par la loi de la conservation du moment angulaire. Il est donc primordial pour optimiser la performance de stabiliser les moments de force au sol pour réduire les rotations parasites.

Cet exemple d'étude sur les bras illustre tout à fait cette idée de modélisation multisegmentaire intégrative. En effet, le rôle des bras et les conséquences de leurs utilisations sur la performance ne peuvent être appréhendés qu'au regard de la motricité globale.

Les conséquences d'ordre didactique à tirer de ce type d'études sont multiples : tout d'abord, l'utilisation des segments libres est un facteur primordial dans les sauts, ils servent à alléger, à équilibrer et à propulser. Ces trois notions largement connues par les entraîneurs sont confirmées par cette étude au même titre qu'une deuxième notion, qui, a contrario, fait l'objet de très peu d'attention lors de la mise en place de contenus d'enseignement en athlétisme : le couplage propulsion-équilibre. On voit ici, en effet, qu'il est primordial d'être équilibré pour pouvoir se propulser, quitte, comme ici chez les volleyeurs, à augmenter le temps excentrique. En d'autres termes, cela signifie que la mise en place de situations d'enseignement pour des débutants aura comme objectif premier de résoudre les problèmes d'équilibre, avant de complexifier les situations en focalisant sur l'aspect propulsif. Les exemples sont nombreux. Lors de l'apprentissage du disque, on n'apprend pas la volte avant de savoir lancer équilibré sur deux appuis, on ne

saute pas sur élan complet en longueur avant d'avoir trouvé un équilibre dynamique dans l'envol sur élan réduit.

5. Conclusion

Il semble que si la modélisation biomécanique ne trouve pas forcément sa source dans les interrogations de l'intervention, les résultats qu'elle suggère peuvent susciter différents niveaux de représentations fonctionnelles du corps en mouvement.

En effet, nous pouvons formaliser les modélisations biomécaniques selon deux niveaux hiérarchiques (Tableau 1).

Tableau 1. Hiérarchisation des modélisations en biomécanique, représentation fonctionnelle du corps, et organisateur cognitif chez l'intervenant.

NIVEAU DE MODELISATION DU CORPS HUMAIN	REPRESENTATION FUNCTIONNELLE ASSOCIEE	ORGANISATEUR COGNITIF
1. Modélisation intégrative totale : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Cinématique ▪ Dynamique 	Le corps globalisant	<ul style="list-style-type: none"> - les énergies (mécaniques, cinétiques) - les forces («pousser, tirer»...) - les moments («tourner vite»...)
2. Modélisation cinématique multisegmentaire intégrative	Le corps segmenté ou fragmenté	mécanique analytique et cinématique : <ul style="list-style-type: none"> - rapport de position (abduction, adduction, flexion...) - rapport angulaire (plus ou moins ouvert, fermé...) - vitesse, amplitude

Le premier niveau ou niveau supérieur est celui qui réduit à l'expression la plus simplifiée la représentation du corps humain. Ce modèle général intègre de fait tous les aspects hiérarchiques inférieurs du mouvement. Il définit une finalité dont tous les autres aspects

du mouvement ne sont que des moyens. Il renvoie à un corps globalisant. Il se scinde en deux, selon qu'il fait référence à du mouvement (cinématique) ou à des forces (dynamiques). Dans l'exemple que nous avons proposé de la modélisation du corps humain en système masse ressort, le corps devient «corps rebondissant». L'organisateur cognitif qui va structurer le discours de l'enseignant intègre les notions d'énergie (mécanique, cinétique) ou encore de force lorsque cette approche est dynamique, comme pour la signature du saut vertical.

Ainsi, lorsque l'enseignant dit «pousse longtemps» lors de l'impulsion avant une haie et «passe vite sur ton appui» en réception, il ne donne aucune modalité de réalisation sur le franchissement en lui-même. En effet, la représentation fonctionnelle liée à cette approche dynamique suppose que pour pousser longtemps, il faut forcément être loin de la haie et orienter le vecteur force vers l'avant, d'une part ; et pour passer vite sur l'appui, il faut être aligné en sortie de haie et avoir une vitesse de rabattement de la jambe supérieure à la vitesse de déplacement corporel, d'autre part. En d'autres termes, cette simple consigne associée à ce mode de représentation a une multitude de conséquences motrices sous-jacentes. On retrouve, dès lors, dans le registre langagier des métaphores issues directement du modèle du type «rebondit comme un ressort» ou encore «ton corps est indéformable lorsque tu touches le sol», faisant référence, soit à la raideur mécanique dans le premier cas, soit aux déperditions énergétiques dans le deuxième cas.

Le deuxième niveau est la modélisation cinématique segmentaire intégrative. A ce niveau, le corps devient une entité structurée en sous entités fonctionnelles. Ces entités peuvent prendre l'aspect d'un segment en particulier (bras, main) ou de l'ensemble de plusieurs segments (membres inférieurs, «haut du corps»...). Le corps est représenté comme «un corps fragmenté» ou «segmenté». Le discours didactique de l'enseignant qui se base sur ce type de modèle est construit à partir de la mécanique analytique : positions ou angles inter-segmentaires, caractéristiques cinématiques du mouvement (vitesse, amplitude).

Ainsi, la même situation de franchissement de haie aura des consignes différentes issues de cette approche modélisante : « attaque loin de la haie par une fermeture cuisse jambe, puis ouvre ensuite pour franchir ta haie » en réception, les consignes seront du type «ferme vite ta jambe au sol et reste aligné». Les consignes seront plus précises et ciblées sur des segments corporels qui correspondent à l'idée que se fait l'enseignant du mouvement juste, c'est-à-dire des bons positionnements spatio-temporels des segments entre eux et/ou par rapport à des repères externes (sol, haie).

Si nous avons pu dégager deux niveaux hiérarchiques dans les modélisations biomécaniques, et montrer en quoi ils peuvent influencer le discours didactique, il est

évident que chaque enseignant peut croiser en tant qu'organisateur cognitif ces niveaux, en fonction des contextes ou encore de son niveau d'expertise vis à vis de l'activité enseignée.

Le rôle de la modélisation biomécanique lors de l'intervention didactique paraît donc multiple. Il permet, d'une part, de focaliser sur les aspects pertinents d'un geste sportif au regard de la performance, et donc, en ce sens, peut influencer les choix des contenus d'enseignements.

D'autre part, la modélisation en tant que construction hypothétique se substituant au système réel, permet une représentation mentale du geste juste chez l'élève, à travers notamment l'utilisation du langage imagé, avec les deux niveaux que nous avons pu dégager.

Enfin, il permet à l'enseignant d'augmenter ses connaissances d'un champ dont l'objet même est le corps en mouvement et change de fait ses représentations fonctionnelles, ce qui transpire à travers son discours didactique et les différents registres qui jalonnent ses consignes.

Bibliographie

- Arampatzis, A., Schade, F., Walsh, M., & Brüggerman G. (2001). Influence of leg stiffness and its effect on myodynamic jumping performance. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 11, 355-364.
- Berthoz, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Paris : Odile Jacob.
- Chaumeil, J.G. (2000). Contribution à une épistémologie de l'éducation Physique et Sportive. Thèse de doctorat non publiée, Université de Lyon 2, Lyon.
- Cizeron, M. (1998). Savoirs de Référence dans la communication didactique. Colloque Antibes. Décembre 1998.
- Cizeron, M., & Gal-Petitfaux, N. (2002). Croyances factuelles et croyances représentationnelles en enseignement scolaire de la gymnastique. *STAPS*, 59, 43-56.
- Durey, A. (1997). *Physique pour les sciences du sport*. Paris : Edition Masson.
- Kollias, I., Hatzitaki, V., Papaiakevou, G., & Giatsis, G. (2001). Using principal components analysis to identify individual differences in vertical jump performance. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 72, 63-67.
- Laffaye, G., Bardy, B., & Tair, R. (2006). Upper-limb motion and drop jump: effect of expertise. *Journal of Sports Medicine and Physical Fitness*, 46 (2), 536-543.

- Laffaye, G., Bardy, B., & Durey, A. (2007). Principal component structure and sport-specific differences in the running one-leg vertical jump. *International Journal of Sports Medicine*, 28 (5), 420-425.
- Laffaye, G., & Bardy, B. (2005a). Raideur mécanique et expertise lors des sauts verticaux appel un pied. XI^{ème} Congrès ACAPS. Toulouse : 26 octobre- 29 octobre 2005.
- Laffaye, G., Tair, R., & Bardy, B. (2005b). The effect of instruction on leg stiffness regulation in drop jump. *Sciences et Sport*, 20, 136-143.
- Laffaye, G. (2001). Le saut en hauteur en Fosbury : une revue. *Sciences et Motricité* 42, 3-15.
- Mac Mahon, T.A., & Cheng, G.C. (1990). The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *Journal of Biomechanics*, 23, 65-78.
- Tochon, F. (1993). *L'enseignant expert*. Paris : Nathan.
- Varela, F. (1993). *Autonomie et connaissance*. Paris : Seuil.