

DESCRIPTION MÉCANIQUE DE LA GESTION PROPRIOCEPTIVE DU DÉGROUPEUR LORS D'UN SALTO ARRIÈRE

[Mathieu Boucher](#), [Arnaud Decatoire](#), [Ridha Jeddi](#)

De Boeck Supérieur | « Staps »

2003/3 n° 62 | pages 89 à 106

ISSN 0247-106X

DOI 10.3917/sta.062.0089

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://www.cairn.info/revue-staps-2003-3-page-89.htm>

Distribution électronique Cairn.info pour De Boeck Supérieur.

© De Boeck Supérieur. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

Description mécanique de la gestion proprioceptive du dégroupement lors d'un salto arrière

Mathieu Boucher¹, Arnaud Decatoire¹, Ridha Jeddi².

1. Equipe « Mécanique du geste sportif »

LMS - Université de Poitiers - Faculté des Sciences - SP2MI - Téléport 2
Bd Pierre-et-Marie-Curie - BP 30179 - 86962 Futuroscope Chasseneuil Cedex - France

2. ISSEP Ksar Said - 2010 La Manouba-Tunis

Résumé : Lors d'un salto arrière, le gymnaste dispose d'informations en provenance de multiples récepteurs. La littérature relative aux rôles respectifs de la vision et de l'oreille interne présente souvent des contradictions. En revanche, les aspects proprioceptifs, quelquefois évoqués, ont peu été détaillés jusqu'ici. L'objectif de cette étude est de savoir si un paramètre mécanique pourrait informer le gymnaste sur son orientation dans l'espace et ainsi l'aider à déclencher son dégroupement au bon moment, lors d'un salto arrière. Nous nous sommes intéressés aux récepteurs articulaires en procédant au calcul de la force de liaison **T** entre la tête et le tronc. Comme cet effort fluctue en fonction des mouvements de la tête et du tronc, nous avons conjointement étudié l'évolution de **T** et de la force d'entraînement engendrée par le mouvement du tronc, en appliquant le principe fondamental de la dynamique au système tête dans un référentiel non-inertiel lié au tronc. Le fait que le dégroupement se produise lors du passage par la verticale renversée semble être associé à une coïncidence. L'origine du dégroupement pourrait être attribuée au passage par un extremum, 80 ms avant, de la composante de cisaillement **T_{ci}**.

Mots clés : salto arrière, référentiel non-inertiel, proprioception, force de liaison.

Mechanical description of the straightening's proprioceptive control during a backward somersault

Abstract : During a backward somersault, the gymnast disposes of information from multiple receptors. The literature is somewhat controversial about the respective role of vision and that of the internal ear during this activity. Little is known about the proprioceptive aspects. The purpose of this study is to know if a mechanical parameter could inform the gymnast of its orientation in space and that help him to set off its straightening at a good time, during a backward somersault. The contribution of the articular receptors was estimated by calculating the joint force **T** between the head and the trunk. As this force fluctuates as a function of the head's and trunk's motion, the time evolution of shear (**T**) and the inertial

* mathieu.boucher@etu.univ-poitiers.fr - decatoir@etu.univ-poitiers.fr - Rhida.Jeddi@issep-ks.rnu.tn

force (**Fe**) generated by the trunk's motion was calculated, by applying the 2nd Newton's law to the head system in non-inertial frames of reference tied to the trunk. The fact that the straightening occurs then the gymnast is in an inverted vertical position seems to be only coincidental. The cause of the straightening could be attributed to the shearing component **Tci** which occurs, 80 ms beforehand.

Key words : backward somersault, non-inertial frames of reference, proprioception, joint force.

GLOSSAIRE

R(O,X,Y,Z) : référentiel galiléen d'origine O tel que

(OY) représente l'axe horizontal,
(OZ) représente l'axe vertical,
et (OX) représente l'axe transversal orthogonal au plan du mouvement.

R*(G,X,Y,Z) : repère de Koëinig

R'(G_{Tronc},X',Y',Z') : repère non inertiel d'origine G_{Tronc} tel que

G_{Tronc} Z' est porté par l'axe longitudinal du tronc passant par G_{Tronc}.

G_{Tronc} X' est porté par l'axe transversal du tronc passant par G_{Tronc},
et **Y'=Z' ∧ X'**.

R''(G_{tt},X'',Y'',Z'') : repère non inertiel d'origine G_{tt} tel que

G_{tt} Z'' est porté par l'axe longitudinal de la tête passant par G_{tt}.

G_{tt} X'' est porté par l'axe transversal du tronc passant par G_{tt},
et **Y''=Z'' ∧ X''**.

g : vecteur pesanteur.

S_i : segment i indéformable articulé par une liaison de type pivot à un degré de liberté.

O_i : centre de rotation du segment S_i.

OG et **OG_i** : vecteurs position respectivement du centre de gravité du système et du segment S_i.

m et **m_i** : masses respectivement du système et du segment S_i.

I_G et **I_i** : moments d'inertie respectivement du système en G et du segment S_i en G_i par rapport à (OX).

ρ_i : rayon de giration du segment S_i.

V_{G_R} et **V_{G_i}** : vecteurs vitesse linéaire respectivement de G et G_i.

a_{G_R} et **a_{G_i}** : vecteurs accélération linéaire respectivement de G et G_i.

θ_i : position angulaire du segment S_i par rapport à (OX).

ω_i : taux de rotation du segment S_i par rapport à R.

γ_i : accélération angulaire du segment S_i par rapport à R.

P_{tt} et **m_{tt}** : vecteur poids et masse de la tête respectivement.

G_{tt} : centre de gravité de la tête.

V_{G_{tt}/R} et **V_{G_{tt}/R'}** : vecteurs vitesse linéaire du centre de gravité de la tête dans R et R' respectivement.

a_{G_{tt}/R} et **a_{G_{tt}/R'}** : vecteurs accélération linéaire du centre de gravité de la tête dans R et R'

respectivement.

G_{Tronc} : centre de gravité du tronc.

V_{G_{Tronc}/R} : vecteur vitesse linéaire du centre de gravité du tronc dans R.

a_{G_{Tronc}/R} : vecteur accélération linéaire du centre de gravité du tronc dans R.

a_{eR} : vecteur accélération d'entraînement.

a_{cR} : vecteur accélération de coriolis.

T : vecteur force de liaison tête / tronc.

Tci : composante de cisaillement du vecteur force de liaison **T**

Tco : composante de compression du vecteur force de liaison **T**

Fe : vecteur force d'inertie d'entraînement.

Fc : vecteur force d'inertie de coriolis.

1. INTRODUCTION

Les études portant sur les acrobaties gymniques ont été réalisées dans le but d'apporter aux athlètes et aux entraîneurs une meilleure compréhension de celles-ci. Cette compréhension naît d'une connaissance affinée des mécanismes indispensables à leur bonne réalisation (Pozzo, 1988; Yeadon, 1996; Lee, 1992; Bardy, 1998). Dans cette perspective, l'analyse mécanique apparaît incontournable. Cette démarche a ainsi été appliquée à l'étude de la phase aérienne de saltos arrières (Jeddi, 1999), afin de quantifier les contributions segmentaires à la prise d'impulsion et à la gestion de la phase aérienne; cette approche a mis en évidence l'existence d'un phénomène récurrent à tous les saltos: les gymnastes semblent dégrouper systématiquement à la verticale (tête en bas). La coïncidence de ces événements nous suggère le questionnement suivant: le dégrouper fait-il suite à un signal perçu par les gymnastes ou bien, les gymnastes ont-ils, à chaque instant ou épisodiquement, connaissance de leur orientation dans l'espace?

Une revue de littérature, sur les notions de contrôle postural et de processus d'équilibre, a permis d'appréhender les éléments de l'organisme impliqués dans le repérage de l'individu par rapport à l'environnement. Ces éléments associés à d'autres constituent l'appareil sensoriel. Il peut être dissocié en trois parties: les récepteurs, les voies nerveuses et les centres nerveux. De cet ensemble sont générées les notions de sensation et perception (Caston, 1993). Pour préciser comment l'individu peut percevoir son orientation dans l'espace, il est nécessaire de répertorier les récepteurs sensoriels pouvant l'en informer, et de préciser les stimulations auxquelles ils sont sensibles.

Caston (1993), Berthoz (1997) et plus généralement les psychophysiologistes distinguent trois systèmes sensoriels que sont le système vestibulaire, le système tactilo-proprioceptif et le système visuel.

Le système vestibulaire est formé par le système otolithique et les canaux semi-circulaires. Ils sont stimulés respectivement par la résultante de l'accélération linéaire de la tête et de la pesanteur, et par l'accélération angulaire de la tête.

Le système proprioceptif est lui composé des fuseaux neuro-musculaires (FNM), des organes neuro-tendineux de Golgi (OTG) et des corpuscules articulaires. Les deux premiers peuvent être regroupés en un capteur unique évaluant les efforts inter-segmentaires à chaque articulation de l'athlète. Les corpuscules articulaires interviennent eux principalement dans le repérage de la position des segments les uns par rapport aux autres.

Mais un tel consensus observé sur les fonctions générales des organes sensoriels se nuance dès lors que l'on analyse leurs fonctionnalités dans les acrobaties gymniques. Les études sur les saltos arrières se caractérisent ainsi par d'importantes divergences quant à la conception des auteurs sur le rôle respectif de chacun des systèmes sensoriels.

Berthoz présente la vision comme étant inopérante pendant la phase de grouper de l'athlète, la vitesse de rotation étant trop importante: «la vision est inutile car le glissement des images sur la rétine est trop grand» (Berthoz, 1997, 75). Or Lee (1992) et Bardy (1998) affirment au travers de la théorie du facteur tau que le système visuel est le seul système permettant à l'athlète de gérer sa vitesse de rotation, et ainsi de contrôler son atterrissage. D'autres auteurs se prononcent pour une prévalence du système vestibulaire; Yeadon (1996) a ainsi mis en évidence dans la réalisation de doubles saltos arrières tendus l'existence de corrections pendant le vol. Ces corrections modifient l'axe de rotation du gymnaste, afin que celui-ci soit confondu au mieux avec l'axe transversal du gymnaste passant par son centre de gravité. Il émet l'hypothèse que les récepteurs l'informant sur la qualité de la rotation sont ceux du système vestibulaire, la vue ne semblant intervenir que dans le contrôle de l'orientation du corps à la réception. Pozzo (1988) a insisté sur le caractère multi-modal des informations associées au mouvement de rotation: l'athlète intègre ainsi l'ensemble des données issues du système vestibulaire et du système proprioceptif.

Les divergences portant sur le rôle des systèmes sensoriels ainsi que la présentation de la sensation comme l'intégration de plusieurs stimulations mettent en évidence que le fonctionnement de l'appareil senso-

riel lors des gestes sportifs est toujours sujet à réflexion, et que les parts respectives des systèmes visuel, vestibulaire et proprioceptif sont encore à préciser dans certaines disciplines. Or l'analyse mécanique peut contribuer à la compréhension du fonctionnement du système proprioceptif. En effet, le calcul des efforts articulaires nous informe sur les stimuli enregistrés par ses récepteurs propres.

C'est pourquoi nous proposons d'analyser la tête, considérée comme primordiale dans la gestion de notre équilibre (Paillard, 1976) du fait de la centralisation des organes visuels et vestibulaires, au travers la quantification de la force de liaison entre le segment tronc et le segment tête. Notre objectif est alors de mettre en évidence à partir des variations de cette force de liaison l'existence d'un possible signal de dégroupement.

2. MÉTHODES

2.1 Protocole expérimental

Le geste retenu pour cette étude est un salto arrière groupé réalisé de pied ferme, c'est-à-dire sans course d'élan, par un gymnaste international de 60 kg et mesurant 1,68 m.

Le geste est réalisé en laboratoire après une session d'échauffement gérée par le gymnaste. Le mouvement des différents segments de l'athlète est capturé à l'aide du système d'analyse d'images 3D SAGA 3 de la société BIOGESTA comprenant quatre caméras synchrones filmant à 50 Hz. Ce système est associé à une plate forme de force de type Kistler (40 x 60 cm), échantillonnée à 2500 Hz, enregistrant les actions exercées par l'athlète sur le sol durant les phases d'appel et de réception.

2.2 Modèle mécanique

La modélisation du corps adoptée pour une analyse 2D, suffisante dans notre cas, puisque le mouvement se situe dans le plan vertical (yoz), est celle décrite par Winter (1990). Vingt marqueurs passifs sont disposés sur des repères anatomiques déterminés à partir de tables anthropométriques.

Le corps du gymnaste est alors modélisé comme un système articulé composé de quatorze segments rigides (S_i), dont les caractéristiques inertielles sont obtenues à l'aide des coefficients anthropométriques donnés par les tables de Winter, et reliés les uns aux autres par des articulations de type charnière (O_i).

2.3 Analyse mécanique

2.3.1 Calcul de la force de liaison entre la tête et le tronc

Nous cherchons dans cette étude à savoir pourquoi le gymnaste effectue son action de dégroupement à un instant donné et pas à un autre. Or, nous avons vu en introduction que la plupart des récepteurs susceptibles de renseigner le gymnaste se situent au niveau de la tête et du cou. C'est pourquoi nous proposons de calculer la force de liaison T entre le système tête et le système tronc.

Afin de cerner au mieux les mécanismes relatifs à l'action de dégroupement, il paraît indispensable d'observer l'évolution de la force de liaison en fonction de la gestulation de l'athlète, c'est-à-dire du mouvement des autres segments et plus particulièrement du segment entraînant le système étudié : le tronc. L'étude plus approfondie de la force liant le système tête au système tronc nécessite alors d'utiliser un autre référentiel non-inertiel R' (Figure 1), lié au tronc, dont l'origine est le centre de gravité du tronc, et de recourir aux lois de composition des vitesses et des accélérations.

La force de liaison T entre la tête et le tronc s'exprime donc en fonction des forces d'inertie qui s'exercent sur le système tête. La démonstration suivante s'appuie sur l'ouvrage de Pérez (1995) :

$$\mathbf{V}_{Gt/R} = \mathbf{V}_{Gt/R'} + \mathbf{V}_{GTronc/R} + \omega_{Tronc/R} \wedge \mathbf{G}_{TroncGt}$$

Après dérivation et développement, nous arrivons à l'expression suivante du principe fondamental de la dynamique dans un référentiel non-inertiel :

$$\mathbf{T} = m_{tt}\mathbf{a}_{Gt/R'} + m_{tt}\mathbf{a}_{e/R} + m_{tt}\mathbf{a}_{c/R} - m_{tt}\mathbf{g} \quad (4)$$

avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_{Gt/R'} &= \frac{d\mathbf{V}_{Gt/R'}}{dt} \\ \mathbf{a}_{C/R} &= 2(\omega_{Tronc/R} \wedge \mathbf{V}_{Gt/R'}) \\ \mathbf{a}_{E/R} &= \mathbf{a}_{GTronc/R} + \gamma_{Tronc/R} \wedge \mathbf{GTroncGtt} \\ &\quad + (\omega_{Tronc/R} \wedge \mathbf{GTroncGtt}) \end{aligned}$$

ou sous une autre forme faisant apparaître les forces d'inertie :

$$\mathbf{T} = m_{tt}\mathbf{a}_{Gt/R'} - \mathbf{F}_e - \mathbf{F}_c - \mathbf{P}_{tt} \quad (5)$$

avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_e &= -m_{tt}\mathbf{a}_{E/R} \quad \text{force d'inertie d'entraînement.} \\ \mathbf{F}_c &= -m_{tt}\mathbf{a}_{C/R} \quad \text{force d'inertie de coriolis.} \\ \mathbf{P}_{tt} &= m_{tt}\mathbf{g} \quad \text{poids du segment tête.} \end{aligned}$$

L'analyse des informations détectées par les capteurs proprioceptifs, FNM et OTG, nécessite de projeter les composantes de \mathbf{T} dans le repère local R'' lié à la tête. De ce fait, nous avons accès aux forces de cisaillement et de compression s'exerçant au niveau du cou.

2.3.2 Détermination des instants de dégroupement et de passage à la verticale

L'étude des mécanismes de l'action de dégroupement impose de déterminer précisément l'instant de dégroupement. Pour cela, nous nous référons à l'évolution du moment d'inertie global du corps par rapport à l'axe transverse passant par G (I_G) que nous obtenons en appliquant le théorème de Huygens :

$$I_G = \sum_{i=1}^{14} (I_i + m_i \mathbf{G}\mathbf{G}_i^2) \quad (6)$$

Ainsi, nous considérons l'instant de dégroupement comme celui qui correspond au minimum de la courbe de I_G en fonction du temps.

Quant au passage par la verticale, auquel on fait référence, il correspond à l'alignement vertical du centre de gravité global du corps et du centre de gravité de la

tête; ainsi, la coïncidence entre les positions horizontales de ces derniers nous indique cet instant particulier du mouvement.

2.4 Traitement des données expérimentales

2.4.1 Calcul des paramètres mécaniques

La détermination des termes de l'équation (5) nécessite, à partir des coordonnées des vingt marqueurs passifs, de calculer les paramètres de vitesse et d'accélération des segments de l'athlète. Ainsi les positions des marqueurs sont lissées par une méthode de lissage polynomiale (Allard et al., 1990) de type Savitsky-Golay. Ce lissage est aussi effectué sur les valeurs de la force de liaison. La méthode de dérivation utilisée pour obtenir les vitesses et accélérations consiste à calculer le rapport de la variation moyenne respectivement des positions et des vitesses, sur 2 intervalles de temps de mesure Δt ($2\Delta t = 0,04s$). Ce paramètre est ensuite affecté à l'instant situé au milieu de l'intervalle $2\Delta t$ (Winter, 1990).

2.4.2 Validation des mesures cinématographiques

Afin de valider nos mesures cinématographiques, nous comparons le moment cinétique calculé à partir des mesures de la plate-forme de force avec celui calculé à partir des données cinématiques mesurées par le système d'analyse d'images. Comme les quantités de mouvement linéaire et angulaire initiales sont connues et nulles, l'intégration du moment des forces extérieures calculé au centre de gravité du système (G) donne directement l'évolution du moment cinétique global du système calculé en G que nous pouvons comparer à celle obtenue à partir des données cinématographiques (Lacouture et Junqua, 1991).

2.4.3 Erreur sur la force de liaison due à la méthode de dérivation

La méthode de dérivation par différence finie permet d'approcher les vitesses et accélérations instantanées en affectant à chaque instant de mesure les vitesses et accélérations moyennes calculées pendant un intervalle de temps de

0.04s. Cette méthode induit des erreurs dans l'application des lois de composition des mouvements. En effet, les relations établies entre le mouvement d'un point matériel et les mouvements de translation et de rotation d'un repère local ne sont plus à considérer comme de strictes égalités vectorielles. La loi de composition des vitesses, par exemple, exprimant la vitesse d'un point matériel M dans un repère R(O,X,Y,Z) en fonction de sa vitesse dans un autre repère R'(O',X',Y',Z') se transforme en l'inégalité suivante :

$$\|V_{M/R}\| \leq \|V_{O'/R}\| + \|MO' \wedge \Omega_{R'/R}\| + \|V_{M/R'}\| \quad (7)$$

La précision de l'approximation dépend du Δt impliqué dans les dérivations et du mouvement de rotation des repères entre eux :

$$\frac{\|\Delta O'M'\|}{\Delta t} \leq \|MO' \wedge \Omega_{R'/R}\| \quad (8)$$

avec M' le point coïncidant avec M.

En effet, l'augmentation de Δt et/ou du taux de rotation de R' par rapport à R ($\Omega_{R'/R}$) provoque une augmentation de l'écart entre les deux membres de l'équation (8) et ainsi sur les deux membres de l'équation (7).

Comme le calcul de la force de liaison repose sur les lois de composition des mouvements, nous avons calculé cette force en appliquant le principe fondamental de la dynamique au système tête dans le repère galiléen :

$$\mathbf{T} = m_{tt} \mathbf{a}_{Gt/R} - m_{tt} \mathbf{g} \quad (8)$$

La comparaison des deux méthodes permet ainsi de donner un ordre de grandeur de l'erreur sur les valeurs de la force de liaison due à la méthode de dérivation par différence finie.

2.4.4. Incertitude sur le repérage temporel des événements

Le système d'analyse d'images est échantillonné à 50 Hz c'est-à-dire qu'il capture le mouvement de l'athlète toutes

les 0,02s. On peut ainsi raisonnablement affirmer que les événements cités dans notre analyse sont repérés à $\pm 0,01s$, le repérage consistant à affecter à chaque événement le temps de l'image qui lui correspond le mieux. (Taylor, 2000)

3. RÉSULTATS

Les résultats sont présentés sous forme de graphiques représentant l'évolution au cours du temps de chaque paramètre. Pour une meilleure lecture de ces graphiques, nous avons choisi de les découper en phases : la phase aérienne est délimitée par les traits mixtes (B et G), les passages par la verticale par les traits en pointillés (A et F). Chaque phase est également repérée par un kinogramme représentant la position du gymnaste à cet instant.

3.1 Erreurs sur les valeurs de la force de liaison

La méthode de dérivation impose d'appliquer avec précautions les lois de composition des mouvements. Pour valider le calcul de la force de liaison dans le repère non-inertiel, on le compare ainsi avec le calcul dans le repère galiléen. Les figures 2a et 2b présentent les composantes y et z des deux forces de liaison. On constate que les courbes de Ty et Tz calculées dans R' se situent par rapport aux courbes de Ty et Tz calculées dans R respectivement dans les intervalles [Ty-6,04 ; Ty+ 20,60] et [Tz-6,20 ; Tz+24,72].

3.2 Détermination de l'instant de dégroupement et du passage à la verticale

L'évolution au cours du temps du moment d'inertie global du gymnaste calculé en son centre de gravité (Figure 3) nous permet de déterminer l'instant de dégroupement ; en effet, celui-ci correspond à l'augmentation du moment d'inertie global lors de la phase aérienne ; nous avons donc pu situer l'instant à 2.52 s (E). Or il est admis qu'un délai de 80 à 120 ms est nécessaire entre la prise de décision par le gymnaste d'effectuer son dégroupement et la

réalisation effective de son action (Johansson, 1991 ; Vos et al., 1990); nous avons reporté sur le même graphique ces instants particuliers par des traits verticaux continus (C et D). On notera que les instants de dégrouper et de passage par la verticale renversée, mis en évidence par la figure 4 à $t=2,54$, sont séparés par 0.02 s au plus.

De ce fait, il est possible en prenant en compte l'incertitude sur le repérage temporel que le passage à la verticale coïncide avec le dégrouper.

3.3 La force de liaison entre la tête et le tronc (T) et la pseudo-force d'entraînement

Les résultats suivants, contrairement aux précédents, sont exprimés dans le repère R'' situé au niveau du cou du gymnaste (Figure 1). Ceci nous permet, comme précédemment explicité, d'avoir directement accès aux forces de cisaillement et de compression s'exerçant au cou et ainsi d'être au plus près du fonctionnement des récepteurs articulaires (FNM, OTG).

La figure 5 représente l'évolution de la force de cisaillement (T_{CI}) dans le sens antéro-postérieur par rapport au gymnaste. On constate une valeur maximale de 122 N à $t=2.44s$. La figure 6 montre l'évolution de la force de compression (T_{CO}) s'exerçant verticalement par rapport au sujet. Celle-ci passe par un minimum de -203 N à $t=2.58s$.

Les termes entrant dans la constitution de la force de liaison, qui sont les forces d'entraînement et de coriolis, le poids de la tête et la quantité d'accélération de la tête par rapport au tronc, sont présentés sur un même graphique. La composante y correspond à la composante de cisaillement et la composante z à la composante de compression.

Les figures 7 et 8, établies à partir de l'équation (5) illustrent les variations respectivement des composantes horizontale et verticale de ces paramètres. On constate principalement un m_{t,ae_y} maximum de 160 N à $t=2.44s$.

DISCUSSION

Les différences entre les deux méthodes de calcul de la force de liaison du système tête sur le système tronc sont parfois supérieures à 10%, mais la cinétique des courbes reste identique. Comme l'interprétation de la force de liaison repose sur l'étude des variations en termes d'extremum, on peut raisonnablement négliger l'erreur sur la force de liaison calculée dans le repère non-inertiel et exprimer celle-ci dans le repère lié à la tête au travers des composantes de cisaillement et de compression.

L'analyse de ces composantes au passage à la verticale ne peut pas argumenter en faveur d'une corrélation entre cet événement et l'évolution des courbes; car le maximum $T_{ci\ max}$ et le minimum $T_{co\ min}$ sont repérés respectivement 80ms avant et 60ms après. Le passage à la verticale ne pourrait donc pas constituer un signal ou être à l'origine de modifications sensorielles déclenchant le dégrouper.

Devant ce constat, nous avons repris la notion du temps de réaction développée en neurosciences qui précise que le délai entre la prise d'information et l'ajustement moteur est compris entre 80 et 120ms (Johansson, 1991; Vos et al., 1990). Appliquée au système visuel, cette considération semble rejeter toute possibilité pour l'athlète de déclencher son mouvement à partir de la vision et ainsi la théorie du facteur tau appliquée au salto arrière (Lee, 1992; Bardy, 1998); en effet l'orientation de la tête vers le haut à ces instants ne favorisant pas une prise d'information sur l'environnement, et en particulier sur le plan formé par le sol. En revanche, 80ms avant le dégrouper, on constate que T_{ci} est maximal. Il s'opère alors une coïncidence entre le repérage théorique de la stimulation des récepteurs articulaires et l'évolution de la force de liaison en terme de cisaillement seulement; en effet la composante de compression présente un minimum $T_{ci\ min}$ 60ms après, donc plus tardivement. Malgré tout, le maximum de T_{ci} , 80ms avant le dégrouper, tend à conforter la conjecture selon laquelle les efforts intersegmentaires sont à l'origine de ce dégrouper. Toutefois celle-ci ne peut être validée, et par conséquent n'être conforme à la réa-

lité du geste, que dans la mesure où l'on a identifié les causes du maximum de T_{ci} et vérifié que ces causes confortent la corrélation entre dégroupier et force de liaison.

L'application du principe fondamental de la dynamique dans le repère non-inertiel lié au tronc a ainsi pour objet de préciser les déterminants de la force de liaison en relation avec, à la fois le mouvement du tronc par rapport au repère du laboratoire, et le mouvement de la tête par rapport au tronc. Le maximum de T_{ci} s'avère être dû à la force d'entraînement $-m_{tt}a_{cy}$. Les autres termes constituant la force de liaison ($-m_{tt}a_{cy}$ et $m_{tt}a_{Gt/R'}$) ont une action négligeable sur T_{ci} . L'intensité de la stimulation des récepteurs articulaires est ainsi conséquente au mouvement du système entraînant la tête, c'est-à-dire au mouvement du tronc. Le mouvement de la tête par rapport au tronc caractérisé par $m_{tt}a_{Gt/R'}$ et créant le $m_{tt}a_{cy}$ n'intervient, quant à lui, que peu sur la force de liaison à cet instant.

Ce constat met en avant une possible contribution de l'approche mécanique à la compréhension des sensations du gymnaste lors du salto; mais cette contribution ne peut se finaliser qu'en déterminant l'ensemble des éléments pris en compte par l'athlète pour commander son mouvement. La perspective à ce travail est donc l'étude des autres récepteurs sensoriels ou, en d'autres termes, l'étude des interactions multi-modales (Berthoz, 1997). D'autres paramètres, d'autres méthodes de calcul et par conséquent d'autres repères sont à utiliser. Berthoz émet d'ailleurs l'hypothèse que le cerveau change trois fois de référentiels. Cette notion de référentiel est à différencier des repères locaux présents dans notre analyse mécanique. Le référentiel renvoie ici à la nature de l'information. Ainsi il distingue les référentiels égocentrique, allocentrique et celui lié à l'espace extérieur: la gravité; et affirme alors que «l'enjeu est de comprendre quels référentiels utilise le cerveau et s'il le fait dans le sens que donnent à ce concept les mathématiques» (Berthoz, 1997, 109). Il serait donc pertinent que l'analyse mécanique des récepteurs sensoriels soit mise en correspondance avec cette notion de référentiel afin que l'on puisse déterminer le ou les référentiels dont dispose l'athlète pour exécuter son salto arrière.

CONCLUSION

La quantification de la force de liaison avec la prise en compte du délai nécessaire à la réponse motrice a mis en évidence que la force de cisaillement dépendant principalement du mouvement du tronc pouvait constituer le signal de dégroupier. Une analyse mécanique de la rotation de l'athlète n'aurait abouti qu'à la détermination des paramètres cinématique, cinétique, dynamique de rotation du système polyarticulé et de ses sous-systèmes. Or comprendre le phénomène de dégroupier ne peut se satisfaire du constat du mouvement; ce n'est pas en évaluant les conséquences de l'activité motrice que l'on peut appréhender les mécanismes à l'origine de cette activité.

C'est pourquoi ce travail, analysant une des stimulations du système proprioceptif, s'inscrit dans une approche mécanique plus globale des sensations du gymnaste, avec pour finalité l'analyse de tous les systèmes sensoriels utilisés dans le contrôle de la posture.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLARD, P., BLANCHI, J.P., GAUTIER, G., AISSAOUI, R. (1990). Technique de lissage et de filtrage de données biomécaniques. *Science & sports*, **5**, 27-38.
- BARDY, B. G. (1996). Approche des systèmes d'action en gymnastique. *Dossier EPS*, n°25, 53-64.
- BARDY, B. G. et LAURENT, M. (1998). How is body orientation controlled during somersaulting? *Journal of experimental psychology, human perception and performance*, **24** (n°3), 963-977.
- BERTHOZ, A. (1997). *Le sens du mouvement*. Editions Odile Jacob, Paris.
- CASTON, J. (1993). *Psychophysiologie TOME 1*. Ed. Ellipse.
- JEDDI, R. (1999). *L'utilisateur d'un système d'analyse 3D confronté aux problèmes d'une étude mécanique des gestes sportifs*. Thèse de doctorat, Université de Poitiers.
- JOHANSSON, RS. et MAGNUSSON, M. (1991). Human postural dynamics. *CRC Critical Reviews in Biomedical Engineering*, **18**, 413-436.
- LACOUTURE, P. et JUNQUA, A. (1991). Plate-forme de forces et analyse du geste sportif. *Science et motricité*, **15**, 40-50.

- LEE, D. N., YOUNG, D. S. et REWT, D. (1992). How do somersaulters land on their feet? *Journal of experimental psychology, human perception and performance*, **18** (n° 4), 1195-1202.
- PAILLARD, J. (1976). *Tonus, posture et mouvements*. Kayser physiologie tome 2: Système nerveux, muscle. Flammarion, Paris.
- PEREZ, J. P. (1995). *Mécanique, points matériels, solides, fluides*. Masson, Paris, 1995.
- POZZO, T. (1988) Le contrôle moteur en apesanteur: aspects neuro-sensoriels. *Revue EPS*, n° **213**, 63-65.
- TAYLOR, J. (2000) *Incertitudes et analyse des erreurs dans les mesures physiques*. Dunod.
- VOS E.J., MULLENDER, M.G., INGEN SCHE-NAU, G.J. van (1990). Electromechanical delay in vastus lateralis muscle during isometric contractions. *European Journal of Applied Physiology*, **60**, 467-471.
- WINTER, D. A. (1979). *Biomechanics of human movement*. New York: Wiley J. & Sons Inc.
- WINTER, D. A. (1990). *Biomechanics and motor control of human movement*. New York: Wiley J. & Sons Inc.
- YEADON, M. R. et MIKULCIK, E. C. (1996). The control of non-twisting somersaults using configuration changes. *Journal of biomechanics*, **29** (n° 10), 1341-1348.

FIGURE 1 : Schéma récapitulatif des différents référentiels et repères utilisés.

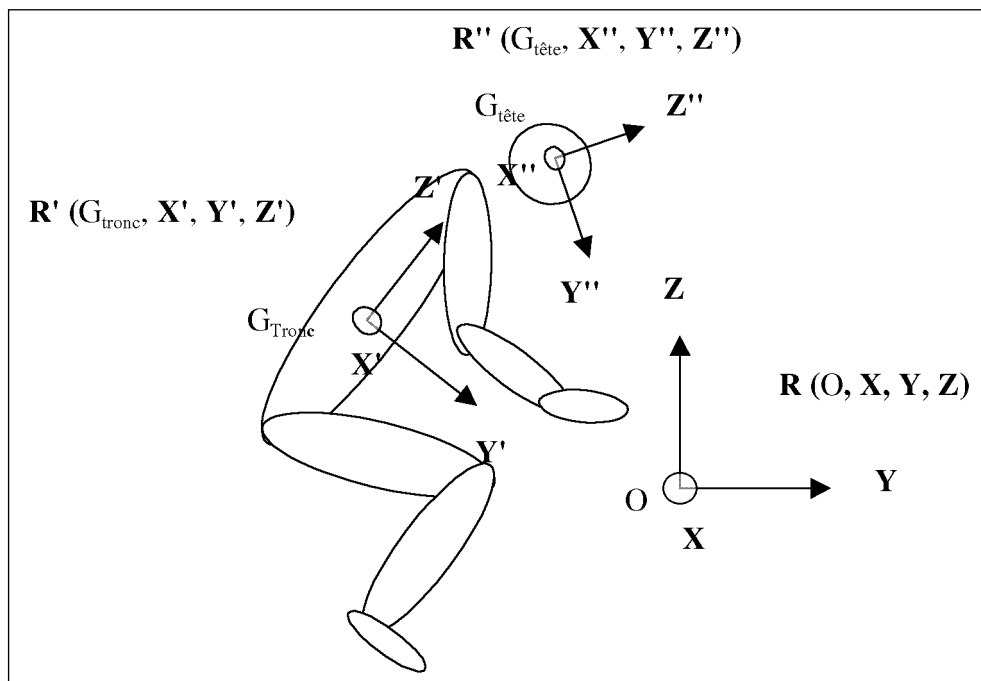


FIGURE 2 : Comparaison de l'évolution de la composante horizontale (2a, en haut) et verticale (2b, en bas) de la force de liaison Tête/Tronc exprimée dans le repère galiléen, calculée dans les référentiels galiléen et non-inertiel lors d'un salto arrière groupé de pied ferme.

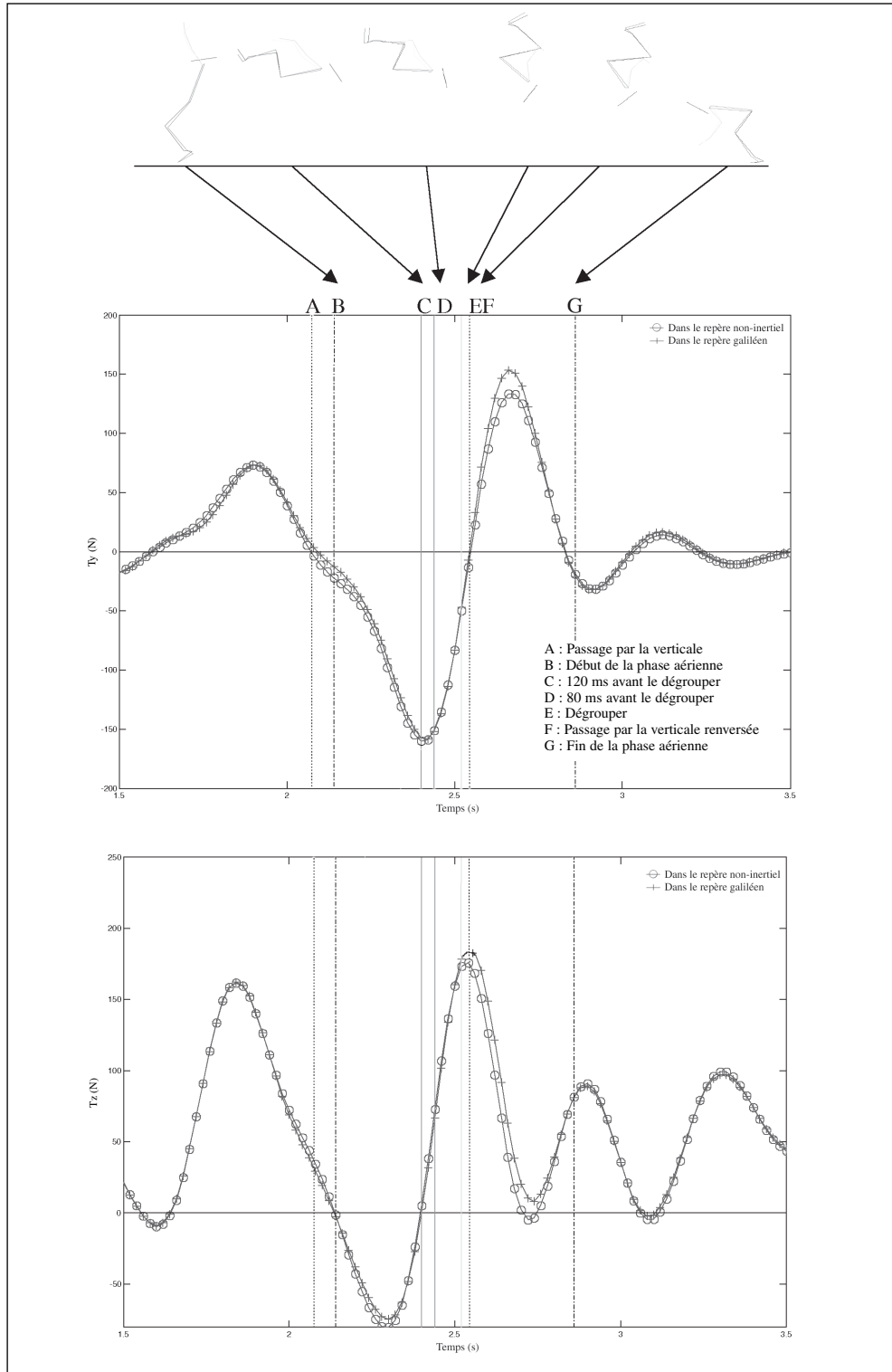


FIGURE 3 : Evolution du moment d'inertie global calculé au centre de gravité du gymnaste lors d'un salto arrière groupé de pied ferme.

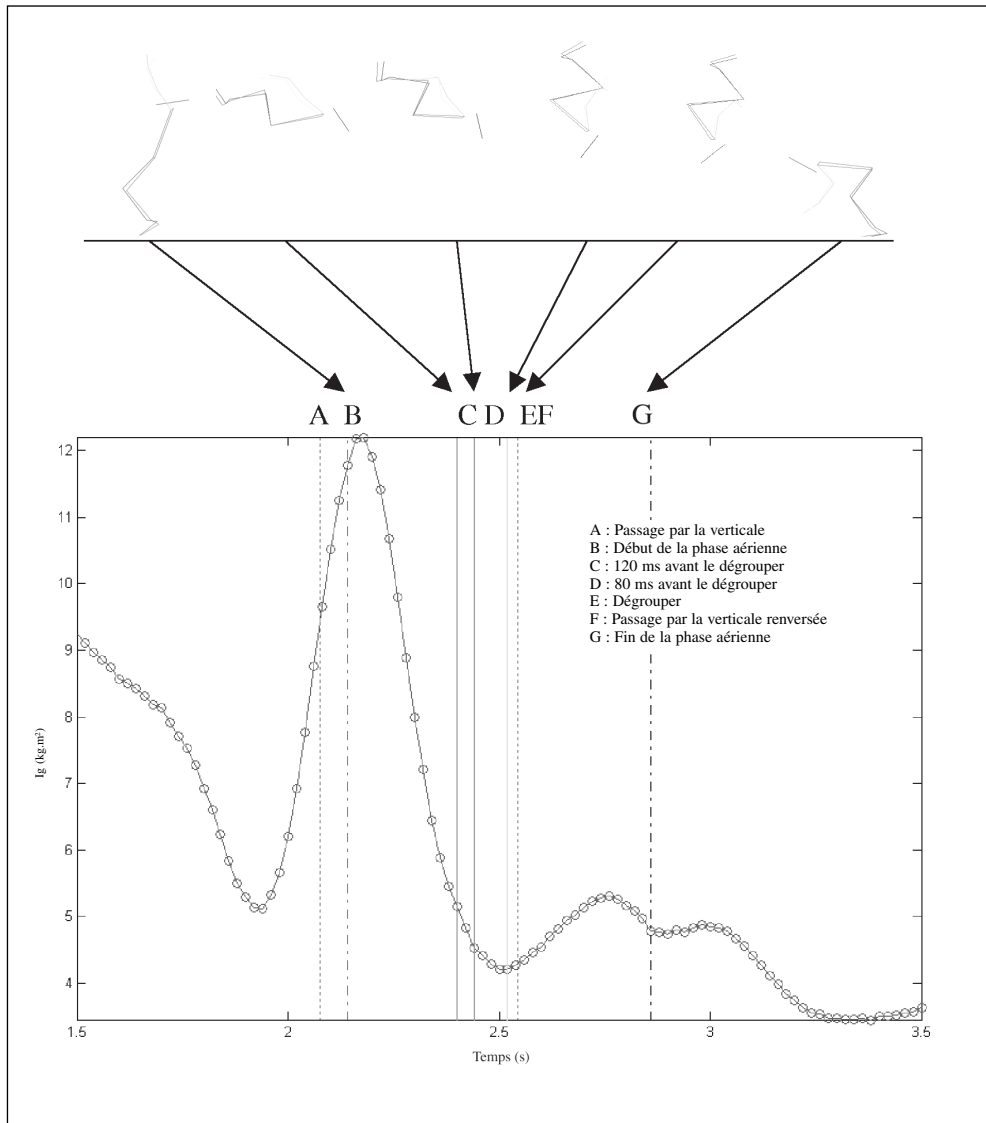


FIGURE 4 : Evolution de la distance horizontale entre le CG du corps et celui de la tête lors d'un salto arrière groupé de pied ferme.

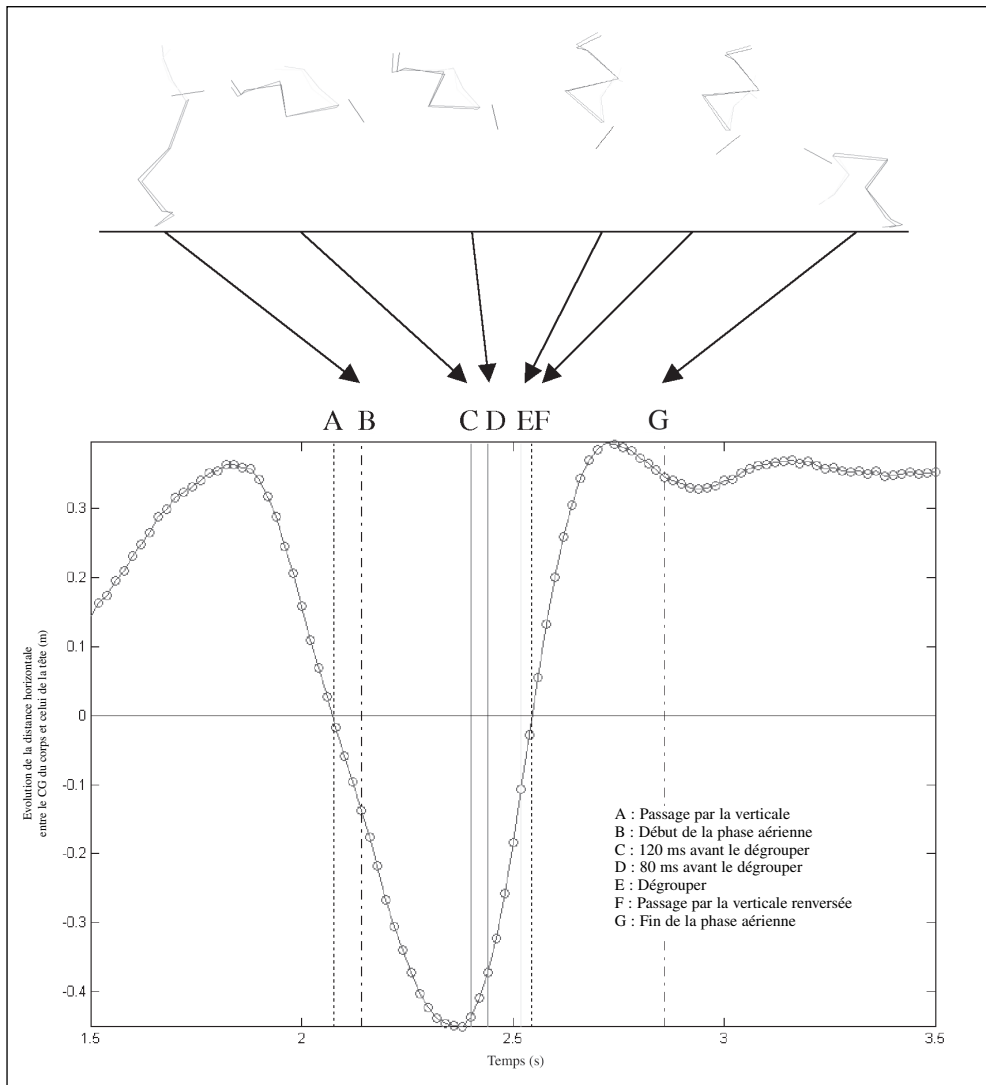


FIGURE 5 : Evolution de la force de cisaillement lors d'un salto arriere groupé de pied ferme.

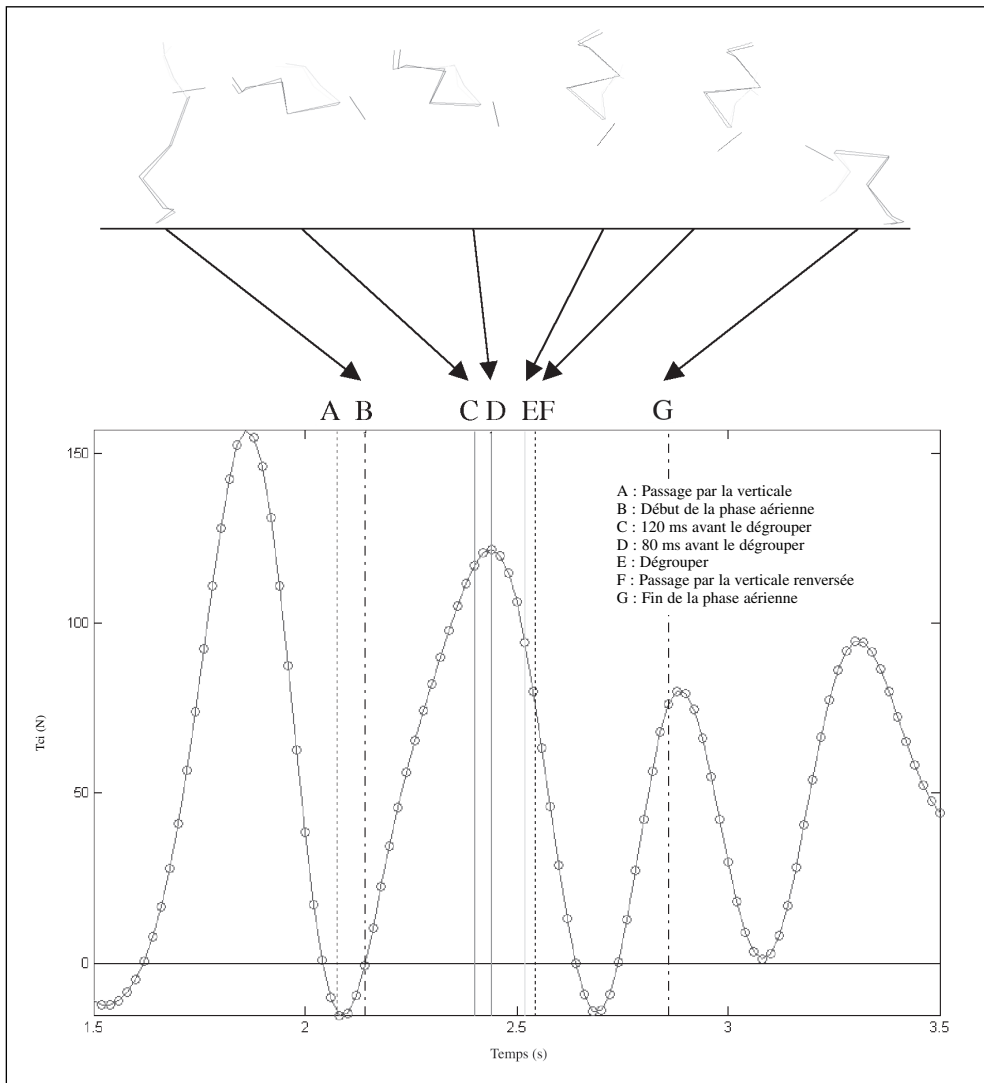


FIGURE 6 : Evolution de la force de compression lors d'un salto arrièrè groupé de pied ferme.

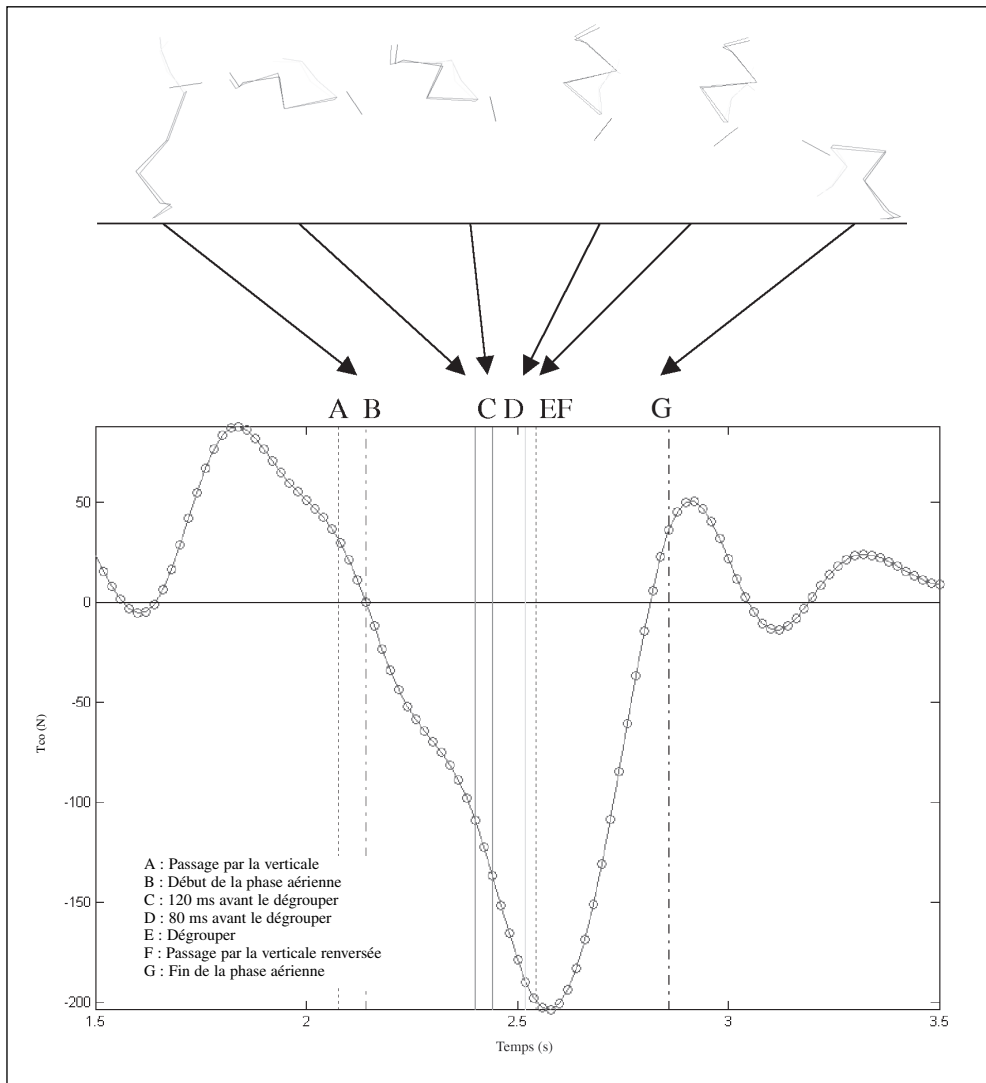


FIGURE 7 : Evolution de la force de cisaillement et de ces termes constitutifs exprimés dans le repère local R'' lors d'un salto arrière groupé de pied ferme.

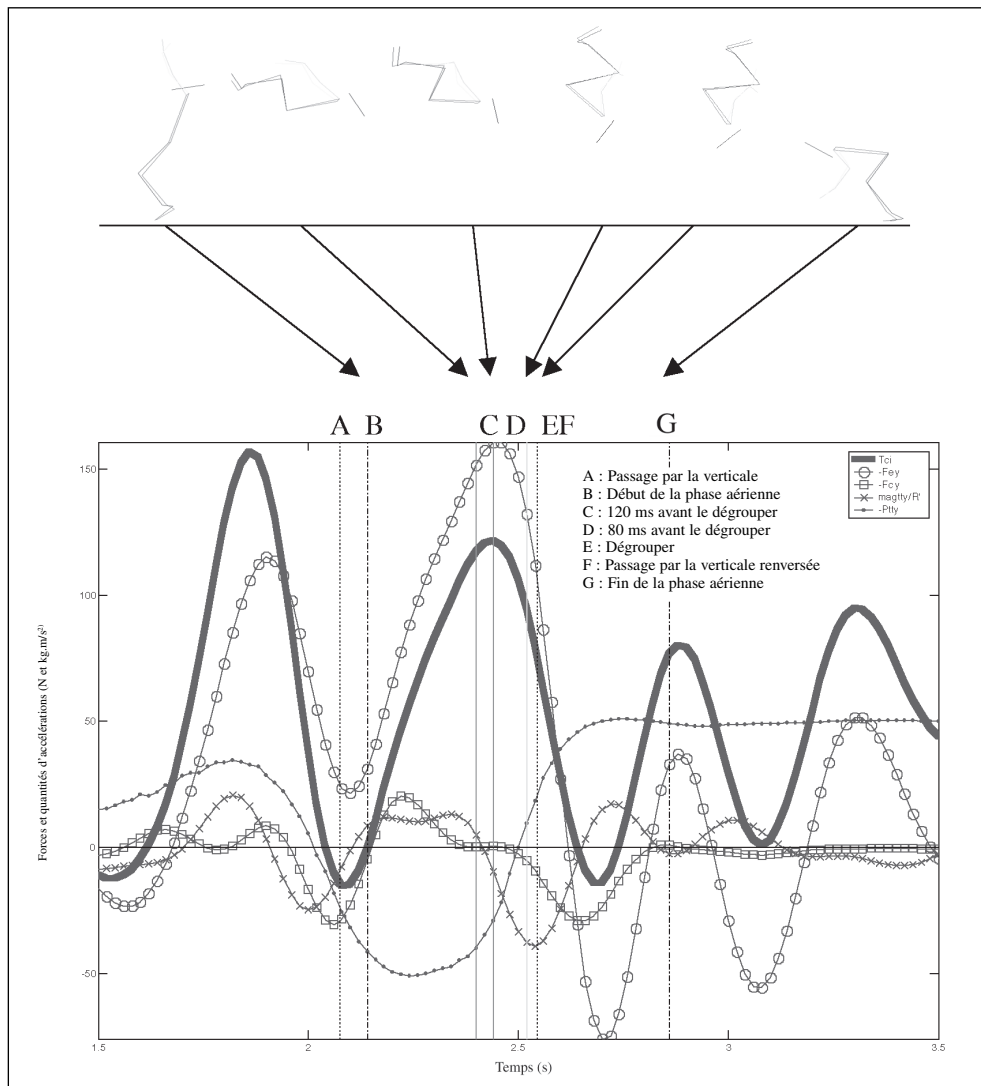
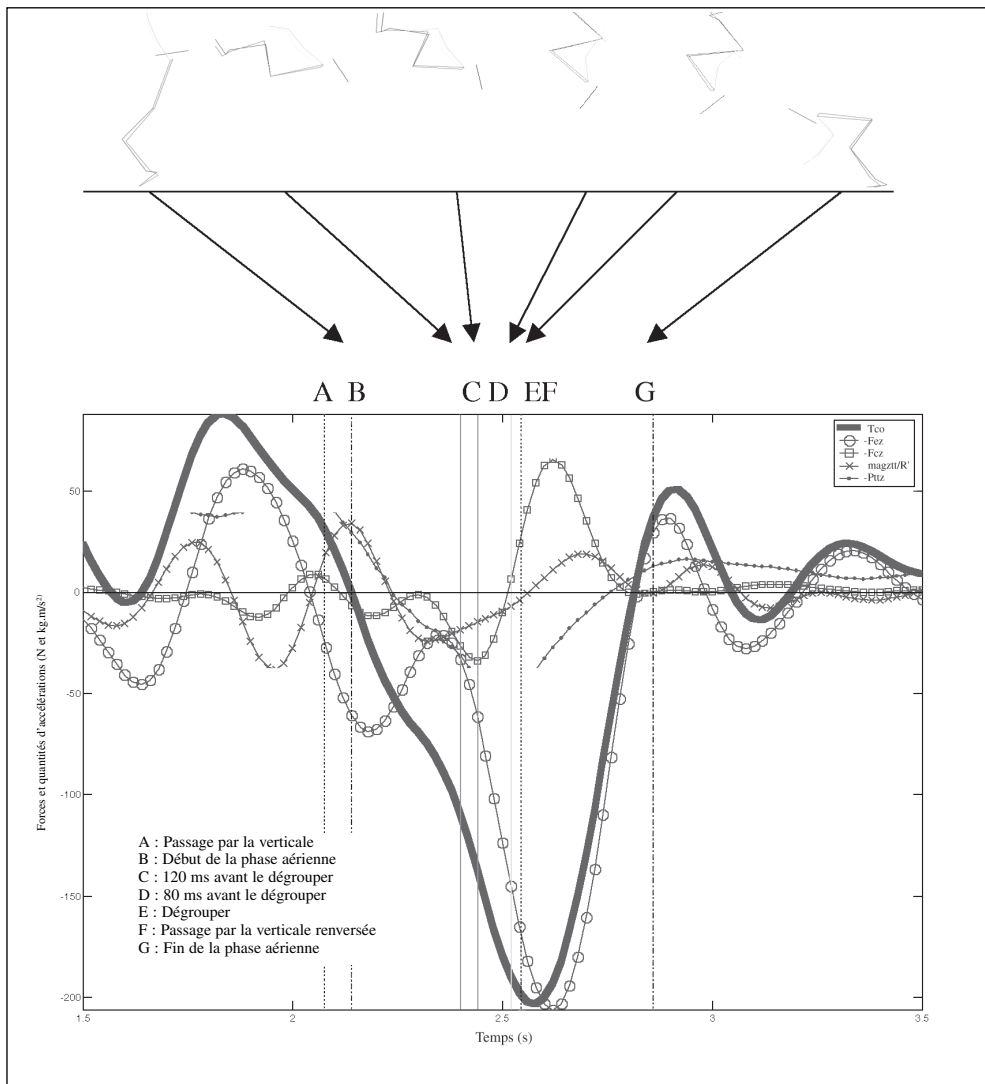


FIGURE 8 : Evolution de la force de compression et de ces termes constitutifs exprimés dans le repère local R'' lors d'un salto arrière groupé de pied ferme.



Mechanische Beschreibung der propriozeptiven Kontrolle des Öffnens bei Salto rückwärts

Zusammenfassung : Beim Salto rückwärts bekommt der Turner Informationen von zahlreichen Rezeptoren. In der Literatur findet man oft Widersprüchliches über die jeweilige Rolle des Sehens und der des inneren Ohres. Über die propriozeptiven Aspekte, die manchmal angesprochen werden, gibt es allerdings nur wenige Details. Ziel dieser Untersuchung ist es, herauszufinden, ob ein mechanischer Parameter den Turner über seine Lage im Raum informieren und ihm dadurch helfen könnte, das Öffnen beim Salto rückwärts im richtigen Moment auszulösen. Wir haben uns für die Gelenkrezeptoren interessiert indem wir die Verbindungskraft T zwischen Kopf und Rumpf berechnet haben. Da diese Anstrengung in Abhängigkeit der Bewegungen von Kopf und Rumpf sich verändert, haben wir gleichzeitig die Entwicklung von T und die Übertragungskraft, die durch die Rumpfbewegung hervorgerufen wird, untersucht und dabei das Grundprinzip der Dynamik auf das System Kopf-Rumpf in einem trägheitsfreien Bezugsrahmen angewandt. Die Tatsache, dass das Öffnen während der Passage durch die rückwärtige Vertikale erfolgt, scheint mit einer Gleichzeitigkeit verbunden zu sein. Das Auslösen des Öffnens könnte dem Durchlaufen eines Extremwertes der Abscherkomponente Tci, 80ms vorher, zugesprochen werden.

Schlagwörter : Salto rückwärts, trägheitsfreier Bezugsrahmen, Propriozeption, Verbindungskraft.

Descrizione meccanica della gestione proprioceettiva della distensione del corpo durante un salto indietro

Riassunto : Durante un salto indietro, il ginnasta dispone d'informazioni provenienti da molteplici recettori. La letteratura relativa ai rispettivi ruoli della visione e dell'orecchio interno presenta spesso delle contraddizioni. Invece, gli aspetti proprioceettivi, talvolta evocati, sono stati poco dettagliati fino ad oggi. L'obiettivo di questo studio è sapere se un parametro meccanico potrà informare il ginnasta sul suo orientamento nello spazio ed aiutarlo così ad innescare la sua distensione al momento opportuno, durante un salto indietro. Ci siamo interessati ai recettori articolari procedendo al calcolo della forza di legame T tra la testa e il tronco. Siccome questo sforzo fluttua in funzione dei movimenti della testa e del tronco, noi abbiamo congiuntamente studiato l'evoluzione di T e della forza d'allenamento generata dal movimento del tronco, applicando il principio fondamentale della dinamica al sistema testa in un referenziale non-inerziale legato al tronco. Il fatto che la distensione si produca nel momento del passaggio dalla verticale rovesciata sembra essere associata ad una coincidenza. L'origine della distensione potrà essere attribuita al passaggio da un estremum, 80 ms prima, della componente di taglio Tci.

Parole chiave : forza di legame, propriocezione, referenziale non-inerziale, salto indietro.

Descripción mecánica de la gestión proprioceptiva de abrir el cuerpo durante un salto atrás.

Resumen: Durante un salto mortal atrás, el gimnasta dispone de informaciones provenientes de múltiples receptores. La literatura relativa a los papeles respectivos de la visión y de la oreja interna, presentan contradicciones. Al contrario, los aspectos propioceptivos, algunas veces considerados, han sido pocas veces detallados hasta ahora. El objetivo de este estudio es saber si un parámetro mecánico podría informar al gimnasta sobre su orientación en el espacio y así ayudarlo a provocar abrir el ángulo en el buen momento, durante el salto atrás. Nosotros nos interesamos en los receptores auriculares procediendo al cálculo de la fuerza de conexión T entre la cabeza y el tronco. Como este esfuerzo fluctúa

en función de movimientos de la cabeza y del tronco, nosotros hemos estudiado conjuntamente la evolución de T y de la fuerza de entrenamiento engendrada por el movimiento del tronco, aplicando el principio fundamental de la dinámica al sistema tete en un referencial no-inercial ligado al tronco. El hecho que el abrir se produzca durante el pasaje por la vertical invertida parece estar asociada a una coincidencia. El origen del abrir podría ser atribuido al pasaje por un extremum, 80ms antes de la componente de agruparse.

Palabras-claves: salto mortal atrás, referencial no-inercial, propiocepción, fuerza de conexión.

NUMÉRO SPÉCIAL DE LA REVUE STAPS

Cet encart a pour but de susciter la production d'articles.

SPORTS ET DOPAGE

Sous la direction de Jacques Gleyse et Gerhardt Treutlein

Les articles doivent être envoyés à l'adresse habituelle
de la direction de la revue

Ils doivent parvenir **avant fin décembre 2003**
dans la perspective d'une publication fin 2004 ou début 2005