

Le saut en hauteur en Fosbury et les facteurs de performance

Science et motricité, 2001, n° 42, p. 3-15

Revue de question

Guillaume Laffaye

Université Paris XI

Division STAPS,

Bât 335

91405 Orsay cedex (France)

Tél. : 01 69 15 62 87

E-mail : Cglaffaye@aol.com

Résumé – G. LAFFAYE (2001) *Le saut en hauteur en Fosbury et les facteurs de performance*. Science et motricité 42 : 3-15.

Les facteurs de performance en Fosbury sont multiples. L'analyse de la technique permet de mieux appréhender le rôle joué par la course en courbe, ainsi que l'intérêt et les limites de la création des rotations à l'impulsion. Cette analyse montre que l'utilisation des segments libres revêt une importance différente selon les sauteurs. Cela suggère que le Fosbury permet à une diversité de morphotypes et de qualités physiques hétérogènes de s'exprimer. La qualité du transfert d'énergie cinétique à potentielle est un des facteurs principaux de la performance. Un modèle mécanique masse-ressort simple permet de cerner les différents paramètres déterminants, notamment le réflexe d'étirement. Certaines voies dans la détection de futurs talents ont été dressées, sans toutefois aboutir à un consensus, basées sur la pertinence des choix dans une batterie de tests athlétiques.

Enfin, une limite aux progrès provient du risque de blessures occasionnées par la répétition des chocs, dont certaines voies de prévention peuvent être aujourd'hui avancées.

Mots-clés : Impulsion / Bond / Détente / Détection / Entraînement.

Introduction

L'athlétisme a connu lors des jeux olympiques de Mexico en 1968 une des plus grandes transforma-

tions d'une technique sportive de son histoire.

Un jeune sauteur en hauteur américain, Dick Fosbury, passa la barre à l'envers, dos à la barre, ce qui déclencha un immense éclat de rire du public.

Les rires se figèrent lorsque le speaker annonçait qu'il venait de sauter 2,24 m, effaçant le record olympique de Brumel et devenant champion olympique.

Il rentrait ainsi dans la légende, offrant son nom à ce nouveau style : le Fosbury-Flop.

Comportement d'un marginal, style sans avenir ?

Aujourd'hui, l'histoire lui a donné raison, et le Fosbury-flop s'est imposé unanimement dans le microcosme des sauteurs en hauteur mondiaux. Avec l'apparition des sautoirs en hauteur en mousse dans les écoles, il est devenu un outil pédagogique privilégié pour les enseignants en éducation physique et sportive.

Les scientifiques ont dès lors désigné ce changement de style sous toutes ses coutures pour en expliquer la prédominance sur le saut en ventral. Biomécaniciens, neurophysiologistes, médecins, entraîneurs, pédagogues se sont penchés sur cette activité attractive, dont l'histoire est riche en rebondissements et la pratique ludique.

Notre propos est de faire ici le bilan des travaux scientifiques internationaux, qui ont jalonné la pratique du saut en hauteur ses trente dernières années. Cependant, une approche scientifique trop éclatée n'est ici pas envisagée. Il est évident que les facteurs de performance en Fosbury sont multidimensionnels : les facteurs physiologiques, motivationnels, mécaniques, psychologiques, voire sociologiques peuvent avoir des incidences dans la réussite de l'activité.

Nous ne pouvons pas tout étudier, et notre choix s'est basé sur l'utilisation de la mécanique et plus particulièrement du modèle masse-ressort pour appréhender l'activité. La raideur mécanique sera donc le concept central de notre argumenta-

tion. Notre problématique est donc essentiellement basée sur les facteurs mécaniques de progrès en saut en hauteur : La technique du saut en hauteur est-elle unique, ou au contraire multiple ? Les progrès sont-ils uniquement liés à des facteurs techniques ? Comment peut-on améliorer ses aptitudes pour le saut en hauteur ? Peut-on les détecter ? Enfin, quels sont les dangers dans l'entraînement au saut en hauteur ?

Nous analyserons pour cela le Fosbury-flop d'un point de vue mécanique en nous basant sur une modélisation assimilant le sauteur à un système masse-ressort simple.

Cela permettra dans un premier temps de statuer sur les déterminants techniques de la performance, en expliquant notamment les différences interindividuelles dans les phases d'approche de la barre.

Dans un deuxième temps, nous analyserons les possibilités de détection, voire de prédiction de la performance en Fosbury, à travers une étude comparative des différents tests moteurs.

Enfin, nous verrons les dangers de l'entraînement, à travers une étude des travaux en médecine et notamment en traumatologie afin de mettre en évidence les blessures les plus classiques en Fosbury et offrir certains moyens de prévention.

Les facteurs de la performance

Afin de mieux appréhender la problématique du saut en hauteur, la compréhension des lois balistiques et physiques appliquées au sauteur semble incontournable. Il s'agit dans cette activité de franchir un obstacle matérialisé par une barre, après avoir pris une impulsion d'un pied. Une fois en l'air, la trajectoire du centre de masse est immuable. Cela n'exclut pas la possibilité de franchir la barre avec un centre de masse soit au-dessus, soit

au-dessous de celle-ci, par le jeu des changements des positions relatives intersegmentaires (Dapéna, 1980; Durey, 1997). En amont de cette trajectoire parabolique décrite en l'air par le centre de masse, le sauteur cherche à arriver au lieu d'impulsion avec une vitesse optimale, c'est-à-dire avec une énergie cinétique acquise, afin de la transformer en énergie potentielle gravitationnelle. Ainsi, si l'on applique la loi de la conservation de l'énergie mécanique (E_m) au moment de l'impulsion, juste avant que le pied ne décolle du sol, on obtient :

$$E_{m_{sol}} = E_{m_{air}} \quad (1)$$

En prenant comme origine la hauteur du centre de masse à la fin de l'impulsion, et en étudiant l'énergie mécanique dans sa composante verticale, il découle de l'équation 1 :

$$\frac{1}{2}mV_{v1}^2 + mgh_0 = \frac{1}{2}mV_{v2}^2 + mgh_1$$

avec m la masse du sauteur, g la gravité soit $9,81 \text{ m.s}^{-2}$, h_0 la hauteur du centre de masse à la fin de l'impulsion, c'est-à-dire l'origine du repère, h_1 la hauteur maximale du centre de masse, V_{v1} la vitesse verticale de décollage et V_{v2} la vitesse verticale au point le plus haut du centre de masse. On a donc $h_0 = 0$, car c'est l'origine du référentiel et $V_{v2} = 0$, car c'est le point de changement de direction du vecteur vitesse horizontale, là où elle est nulle ; soit :

$$\frac{1}{2}mV_{v2}^2 = mgh_1,$$

$$\text{d'où } H_1 = V_{v1}^2/2g$$

la hauteur maximale du centre de masse $H_1 + H_0$ dépendra donc essentiellement de deux paramètres : un paramètre cinématique représenté par la vitesse verticale de décollage et un paramètre morphologique représenté par la hauteur du centre de masse H_0 au moment du décollage. À titre illustratif, en prenant les données enregistrées par système vidéo tridimensionnel des meilleurs sauteurs mondiaux aux championnats du monde Indoor à Indianapolis en 1982 par Dapéna et les analyses faites ultérieurement, il est possible de déduire la performance approximative du sauteur à partir de ces données. Ainsi, un sauteur qui mesure 2 m décollant à 4 m.s^{-1} (les valeurs maximales observées sont de l'ordre de $4,5 \text{ m.s}^{-1}$) avec une hauteur initiale du centre de masse situé à 1,50 m du sol au moment du décollage (Dapéna relève une hauteur initiale du centre de masse H_0 représentant entre 70 et 75 % de la taille de l'athlète), aura son centre de masse à son point le plus haut :

$$H_{\max} = 4^2/(2 \cdot 9,81) + 1,50 = 2,30 \text{ m}$$

On voit ici par cette illustration que la balistique nous offre une voie de compréhension réaliste, même si

le modèle mécanique doit être nuancé dans le cas du Fosbury. En effet, s'il rend bien compte de la hauteur maximale du centre de masse dans l'espace, son application au saut en hauteur doit être pondérée par trois éléments :

– tout d'abord, le rôle joué par la vitesse horizontale est capital, car c'est elle qui va permettre le franchissement de la barre. En effet, sans elle, le sauteur retomberait sur son lieu d'impulsion.

– ensuite, le fait d'avoir le centre de masse au-dessus de la barre ne garantit pas son franchissement, car un segment libre peut la faire tomber, même si celui-ci est au-dessus de la barre.

– enfin, *a contrario*, le sauteur peut dans certaines conditions franchir la barre, tout en ayant le centre de masse en dessous de la barre.

Il n'en demeure pas moins que tout ce qui se passe avant l'envol est déterminant quant à la qualité finale du saut. La trajectoire terminale du sauteur pendant l'envol dépend essentiellement de ce qui s'est passé pendant la phase au sol. Toutes les phases du Fosbury sont donc interdépendantes et détermineront la qualité de l'impulsion. On peut donc décomposer le saut en hauteur en Fosbury en quatre phases interdépendantes : la course d'élan, la liaison course-impulsion, l'impulsion et l'esquive. Chacune de ces phases a un rôle bien précis, et une faute technique dans une de ces phases aura des conséquences fâcheuses sur la phase suivante.

La course d'élan a pour but de vaincre l'inertie du système sauteur, lui conférer une énergie cinétique initiale et surtout lui permettre un placement corporel propice à une bonne liaison course-impulsion.

La liaison course-impulsion, qui représente les quatre derniers appuis, est caractérisée par un changement d'état postural car le sauteur va préparer son impulsion en réorganisant la position de ses segments, afin d'orienter aux mieux les forces à l'impulsion. Le rôle de la course en courbe est ici déterminant dans la performance.

L'impulsion, que nous pouvons définir comme la force imprimée au sol pendant la durée de l'appui, est primordiale, de même que son orientation dans l'espace, car elle déterminera la vitesse verticale de décollage et la hauteur maximale du centre de masse. On verra que le rôle des segments libres est ici important, car ils permettent la création des différents moments de rotation utiles à l'esquive.

Enfin, l'esquive joue un rôle important, car la création par le sauteur

de différentes rotations peut lui permettre de franchir ou non la barre. On verra que dans cette phase, et même à haut niveau de performance, de grosses différences individuelles peuvent être observées.

La course d'élan

Nous entendons par course d'élan la partie rectiligne pendant laquelle le sauteur cherche à augmenter sa vitesse, sans se soucier à cet instant de l'impulsion à venir. Elle est généralement plus proche du stéréotype moteur (le mouvement est conduit), et est jalonnée par des repères extéroceptifs (guidées par la vision), représentés par des marques intermédiaires au sol.

L'objectif de cette course est d'acquérir une vitesse horizontale et un placement optimal avant de s'engager dans la liaison course-impulsion. L'attitude du sauteur est la recherche d'une course avec des appuis brefs, une foulée ample et une fréquence gestuelle peu élevée.

On peut expliquer cette attitude, ainsi que celle qui va suivre, en utilisant le modèle mécanique simple proposé par Cavagna et coll. (1964, 1977). Le sauteur, appréhendé à travers son système musculo-squelettique, se comporte lors de la course, comme un système masse-ressort simple (figure 1) constitué d'un ressort de longueur l (assimilé à la jambe du sauteur) et de raideur k , au-dessus duquel est placée une masse m . La course d'élan comme décrite précédemment peut dès lors être appréhendée comme un enchaînement de foulées bondissantes. Ce système de fonctionnement, inspiré du fonctionnement animal, permet un meilleur transfert des énergies du système (de cinétique à potentielle). En effet, dans la course, la phase d'appui se décompose en deux parties :

– la phase d'amortissement, lorsque l'appui est à l'avant de la verticale

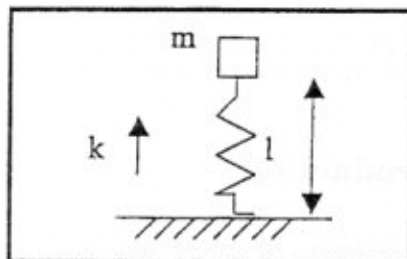


Figure 1 — Modélisation mécanique du sauteur assimilé à un système masse-ressort simple de masse m , de longueur l et de raideur k . D'après Cavagna et coll. (1977).

du centre de masse et que celui-ci s'abaisse;

— la phase de poussée, lorsque le centre de masse se trouve à l'avant de l'appui.

Dans la phase d'amortissement, l'énergie cinétique est emmagasinée et elle est restituée ensuite sous forme d'énergie potentielle gravitationnelle. La qualité de ce transfert dépend essentiellement de la raideur du ressort jambe k . Ce type de locomotion avec foulées bondissantes permet d'augmenter de 70 % le phénomène de stockage-restitution d'énergie élastique par rapport à un mode de contraction concentrique (Alexander et Vernon, 1975). Cette optimisation de l'utilisation de l'énergie cinétique est un argument fort de l'explication de cette locomotion. Ce modèle mécanique simple permet d'extraire les facteurs déterminants de la performance, autant dans la course préparatoire que dans le saut proprement dit. Si l'on considère la course d'élan comme un enchaînement de sauts vers l'avant et l'impulsion comme un saut particulier, on obtient deux équations du mouvement différentielles non linéaires, représentant l'accélération verticale en x et horizontale en y :

$$\ddot{x} = x\omega^2 \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - 1 \right)$$

et

$$\ddot{y} = y\omega^2 \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - 1 \right) - g \quad (2)$$

avec $\omega = \sqrt{k/m}$, et l la longueur du ressort, x et y les compressions horizontale et verticale du ressort. La composante horizontale introduit le paramètre longueur du ressort qui devient aussi important que la constante de raideur. On a dès lors 5 paramètres indépendants: la masse m , la longueur du ressort l , la raideur k , la vitesse au début du contact pied-sol et l'angle β de cette vitesse (représenté dans l'équation par $\sqrt{x^2 + y^2}$). La masse et la longueur étant pour un individu donné des constantes, il reste au sujet trois paramètres pour réguler sa locomotion et la qualité du transfert d'énergie.

Comment réguler cette raideur du ressort? Mac Mahon et coll. (1987) se sont centrés sur ces possibilités de régulation de la raideur k . Ils ont comparé pour cela un mode de course classique avec un mode de flexion de genou exagéré, « the Groucho running ». Deux grandes idées sortent de cette étude:

— la raideur augmente avec la vitesse;

— la raideur diminue avec l'augmentation de la flexion du genou.

Le paramètre « Groucho », ω_0/g avec ω_0 la fréquence naturelle du

ressort (nombre d'oscillations complètes du ressort par seconde) et v la vitesse, permet de faire cette différence entre le mode de course normale et le *groucho running*.

D'autre part, on sait que la fréquence naturelle du ressort ω dépend de la raideur et de la masse:

$$\omega = \sqrt{k/m}, \text{ soit } k = \omega^2 m. \quad (3)$$

Ce qui signifie que la constante de raideur peut être régulée en manipulant la fréquence ω .

On retiendra donc la possibilité de régulation de la raideur par 3 paramètres essentiels: la fréquence, la vitesse de course et l'angle d'incidence de cette vitesse (Farley et Gonzales, 1996).

L'avantage d'une course en foulées bondissantes est également lié à des considérations physiologiques. En effet, la course en foulées bondissantes permet d'optimiser le rendement mécanique du cycle étirement-contraction (Komi, 2000). La préactivation musculaire avant le contact au sol (environ 40 ms pour les muscles gastrocnémien et tibial antérieur) associée à une phase excentrique courte et une transition étirement-contraction rapide contribuent à la mise en place du réflexe d'étirement (Komi et Gollhofer, 1997). Ce dernier joue un rôle déterminant dans la régulation de la raideur (Hoffer et Andreassen, 1981). Il contribue également à une augmentation de la force en fin de phase excentrique (Komi, 2000). On comprend donc bien ici le rôle joué par la préactivation musculaire et le réflexe d'étirement dans la régulation de la raideur.

Ainsi, ce tour d'horizon des modèles mécaniques explicatifs du fonctionnement du sauteur, permet de mieux cerner l'importance de l'attitude de course, à travers la régulation de la raideur du ressort k , et ceci à chaque appui jusqu'à un appui particulier que représente l'impulsion. On a pu voir également que différentes solutions sont possibles pour réguler cette raideur, et ceci s'illustre dans la réalité de l'activité par des différences inter-individuelles dans la gestion de la course d'élan.

On distingue effectivement deux stratégies de gestion de la course d'élan, usuellement nommées le *flop* vitesse et le *flop* amplitude (Peyloz, 1976; Pira et Levarlet, 1978).

Dans le *flop* amplitude, le sauteur utilise plus naturellement la longueur du ressort, assimilée à la longueur de ses jambes, pour avoir une foulée plus ample, la vitesse d'arrivée étant de l'ordre de 7 à 7,5 m/s (Dapena, 1980; Dimitriev, 1983; Peyloz, 1976; Pyra et Levar-

let, 1978). Il s'agit ici essentiellement de sauteurs de grande taille (1,90 m et plus), qui utilisent plus la longueur l du ressort pour optimiser la raideur k . La taille naturelle du ressort étant plus longue, cela leur donne un avantage certain.

Le *flop* vitesse est plus utilisé par les sauteurs de petite taille (moins de 1,90 m), qui compensent la longueur moindre du ressort jambe par une fréquence et une vitesse plus grande (cf. équation 3), afin de mieux réguler la raideur mécanique du ressort. Les vitesses horizontales d'arrivée sont de l'ordre de 8 à 8,5 m/s, et les foulées sont alors plus rythmées et plus dynamiques (Dapena, 1980; Dimitriev, 1983; Peyloz, 1976; Pyra et Levarlet, 1978). Toutes ces données cinématiques sont compilées dans le tableau 1. L'objectif de cette première partie de la course d'élan est donc de donner une vitesse initiale et un placement qui va permettre par la suite au sauteur d'augmenter la fréquence de ses appuis, d'orienter son corps pour le mettre dans les meilleures dispositions pour pouvoir sauter. Il s'agit donc de commencer à réguler la constante de raideur du ressort par les différentes stratégies exposées précédemment, afin de restituer le maximum d'énergie élastique pour préparer l'impulsion. Les deux fautes techniques les plus classiques dans cette phase sont soit une vitesse exagérée, qui ne permettra ni l'augmentation de la fréquence au final, ni l'utilisation optimale du réflexe d'étirement, et par là même l'augmentation de la raideur du ressort, soit un mauvais placement corporel (épaules engagées vers l'avant de la verticale du centre de masse, genoux qui ne montent pas assez pour permettre le changement de fréquence), ce qui retardera la phase de transition et la liaison course impulsion ne pourra se faire que très tardivement. À la fin de la partie rectiligne de la course d'élan, le sauteur va en effet entrer dans la partie transitoire entre course et saut, la liaison course impulsion.

La liaison course impulsion

On appelle liaison course impulsion la phase transitoire pendant laquelle le sauteur va passer d'une phase de course rectiligne, où il cherche à emmagasiner de l'énergie cinétique, à la phase d'impulsion, où il devra la transformer en énergie potentielle gravitationnelle. Elle est caractérisée par un changement de la structure spatio-temporelle de la foulée. Elle est donc primordiale à la qualité du saut et comporte 4 à 6 foulées en courbe à rayon dégressif.

Paramètres	Auteurs	Date	Données	Remarques
Vitesse de course au moment de l'impulsion	Peyloz	1976	7 à 7,5 m/s en flop amplitude.	
	Pyra, Levarlet	1978	8 à 8,5 m/s en flop vitesse.	
Vitesse de décollage	Dapéna	1980	de 6,5 à 8,3 m/s	
	Dimitriev	1983	vit. horizontale: +4 m/s	
	Dapéna	1980	vit verticale +4,4 m/s	
Secteur d'impulsion en translation	Dapéna	1980	Hommes: -5° à -21° Femmes: -6° à -18° en début d'impulsion; -7° à +3° en fin d'appel	Angle tronc-verticale
	Ae et coll.	1986	33,8° à 38,6°	Angle jambe-horizontale
	Peyloz	1976	Plus important chez les sauteurs en amplitude	
Secteur d'impulsion latéral	Dapéna	1980	-10 à -18° en début d'impulsion. +1 à +14° en fin d'appel	Permet le franchissement
	Peyloz	1976	plus important chez les sauteurs en vitesse	
	Dapéna	1980	16 à 24/100° chez les hommes; 14 à 20/100° chez les femmes	
Durée de l'impulsion	Tancic	1978	16 à 18/100°	
	Peyloz	1976	14 à 17/100° en flop-vitesse; 22 à 24/100° en flop-amplitude	

Tableau 1 — Les composantes techniques du saut en hauteur.

Son objectif est double: augmenter la raideur du ressort progressivement en augmentant la fréquence des appuis et la force imprimée au sol; orienter les forces du sauteur pour le placer sur une trajectoire optimale au moment de l'impulsion.

L'augmentation de la force au sol permettra une augmentation de la raideur, car celle-ci peut également s'exprimer en fonction du pic de force maximal F_{\max} et du déplacement vertical du ressort jambe Δl :

$$K = F_{\max} / \Delta l. \quad (4)$$

Cette augmentation de la raideur passera nécessairement par les deux facteurs de régulation vus précédemment:

- une préactivation des muscles gastrocnémien et tibial antérieur (principalement), enclenchée notamment par l'action de l'armé du pied (flexion volontaire de la cheville pendant la phase d'extension),

- la présence du réflexe d'étirement qui contribue à la génération d'une force plus grande dans la phase de transition étirement-contraction (Komi, 2000).

La réorientation des forces va se traduire par une augmentation de la phase d'amortissement, où les appuis vont venir se placer de plus en plus à l'avant de la verticale du

centre de masse, qui sera lui-même en avance sur les épaules. On parle alors de prise d'avance des appuis. Cette prise d'avance est double, car elle se fera selon deux axes:

- dans le plan frontal du sauteur, cette prise d'avance est dite latérale et elle est due à la course en courbe et débute dès l'entrée du sauteur dans le virage.

- dans le plan sagittal, cette prise d'avance des appuis est dite en translation ou antéro-postérieure et elle se fera essentiellement grâce à l'abaissement du centre de masse sur l'avant-dernier appui.

Cette course en courbe, impulsée intuitivement par Dick Fosbury, a longtemps été l'objet de controverses quant à son utilité. De fait, elle crée une force centrifuge, qui possède la propriété de repousser le sauteur vers l'extérieur de la courbe, selon une trajectoire tangentielle.

Le sauteur, en courant incliné vers l'intérieur du virage, crée une force compensatrice, dite force centripète (F), qui dépend de trois paramètres que sont masse (M), vitesse (V) et rayon de courbure (R) (Paolilo, 1989):

$$F = MV^2/R. \quad (5)$$

On comprend dès lors l'utilité d'un rayon dégressif dans la liaison

course impulsion. Cela permet au sauteur d'augmenter progressivement la force imprimée au sol, en utilisant une force centripète croissante, et sans le soumettre à des contraintes musculaires trop importantes dès l'entrée dans le virage. Ainsi, pour de nombreux auteurs, l'intérêt principal de la course curviligne, est d'utiliser l'inclinaison latérale de l'athlète pour emmagasiner de l'énergie afin de franchir la barre (Etourneau, 1973; Higgins, 1974; Labescat, 1972; Nozzoli, 1973).

Pour d'autres auteurs, l'existence de cette force centrifuge pendant la courbe ne permet pas son utilisation lors de l'impulsion, car le sauteur redresse son corps (Heinz, 1971; Kerksenbrock, 1975; Peyloz, 1976; Steiner-Ebenhöh-Knebel, 1970; Stimbire, 1972). Mais derrière ces idées, assez syncrétiques, on peut justifier l'intérêt de cette courbe par quatre grands arguments:

- tout d'abord, elle permet d'augmenter la force imprimée au sol, grâce à la force centripète (Dimitriev, 1986; Peyloz, 1976). Par la troisième loi de Newton (action-réaction), il en résulte une force de réaction plus grande, qui permettra donc une impulsion plus efficace. Cette impulsion, définie par Durey (1997) comme l'intégrale de toutes les forces sur toute la durée de l'appui, déterminera la tra-

jectoire aérienne, dont la hauteur maximale du centre de masse. En effet, l'équation 4 nous montre que plus la force est grande, plus la raideur mécanique sera importante. On peut donc penser que le système masse-ressort sera donc plus efficace au moment de la restitution d'énergie et permettra donc au sauteur une élévation optimale.

— Par la suite, elle permet l'abaissement progressif du centre de masse, sans augmenter de manière excessive les flexions de genoux (Sekioka et Kurihara, 1978). Cela permet ainsi de conserver une constante de raideur importante, c'est-à-dire comprimer le ressort sans avoir les effets rédhibitoires dus à la flexion du genou, démontrés par Mac Mahon *et coll.* (1987).

— Elle est également responsable du moment angulaire qui permettra l'esquive (Dapéna, 1980).

— Enfin, la course curviligne permet au sauteur de poser le pied d'appui à l'avant du centre de masse, et contribue donc à étirer les muscles extenseurs de la hanche. Il résulte de cette action une plus grande puissance musculaire, par l'utilisation de l'énergie élastique musculaire. En effet, la courbe permet d'étirer préalablement les muscles extenseurs, et donc d'assurer une réponse contractile réflexe importante (réflexe myostatique) qui permettra d'assurer la qualité de l'extension du ressort dans la phase finale, en se référant au modèle mécanique proposé. Ces arguments, à la fois physiologique et mécanique, permettent de mieux comprendre le rôle de cette course curviligne.

On peut dès lors essayer de cerner les inclinaisons optimales, qui permettraient la meilleure rentabilité mécanique. Les différentes angulations, relevées sur une population de haut niveau (tableau 1) laissent apparaître de très grandes différences interindividuelles. On entend par secteur d'impulsion ou encore chemin d'impulsion l'angle balayé par le centre de masse pendant l'impulsion. Ainsi, l'inclinaison du tronc par rapport à la verticale dans l'axe de la course (en translation) peut varier de -5° à -21° chez les hommes, et entre -6° et -18° chez les femmes en début d'impulsion (Dapéna et Chung, 1988). À la fin de l'impulsion, elle se situe entre -7° et $+3^\circ$. On remarque donc ici une tendance chez certains sauteurs à décoller avant la verticale, ou au contraire à fuir légèrement vers la barre. Pour l'inclinaison latérale, le secteur d'impulsion balayé par le tronc est plus important. Les angulations tronc/verticale sont entre -10° et -18° en début d'impul-

sion et $+1^\circ$ à $+14^\circ$ en fin d'impulsion.

Ces angulations terminales montrent que c'est le balayage du secteur d'impulsion latéral qui permet au sauteur d'aller vers le sautoir pour franchir la barre. D'autre part, ces angulations influencent la vitesse verticale en fin d'impulsion et donc l'élévation maximale du centre de masse. À même vitesse, même hauteur initiale du centre de masse, c'est l'inclinaison et la vitesse verticale qui détermineront la plus grande performance.

On ne peut donc spéculer sur des angles d'inclinaisons optimaux, car ils dépendent essentiellement des capacités musculaires de l'athlète à balayer un grand secteur d'impulsion sans se soumettre à une grande déperdition de vitesse verticale. Deux données semblent cependant importantes quant à l'optimisation de la performance. Tout d'abord, pour pouvoir franchir la barre, le secteur d'impulsion latéral doit dépasser la verticale, afin de créer une vitesse horizontale minimale pour franchir la barre. On peut donc penser qu'un angle latéral terminal trop important (le maximum observé par Dapéna est de $+14^\circ$) nuira à la performance du sauteur en donnant une trop grande vitesse horizontale au détriment de la vitesse verticale. Le transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle gravitationnelle est alors peu efficace. Enfin, le chemin d'impulsion en translation ne doit pas dépasser l'axe vertical, car il nuirait alors au transfert d'énergie, et diminuerait de manière alarmante la vitesse verticale.

On remarquera, dans l'hétérogénéité de ces angulations, la coexistence d'une pluralité de stratégies motrices dans la manière d'abaisser son centre de masse dans les derniers appuis. En effet, les différences interindividuelles constatées en début de course d'élan, sont ici encore présentes et même accentuées. Ce constat alimente l'idée d'une équifinalité dans cette activité, où l'on peut arriver à des résultats similaires par des stratégies motrices différentes. Ces stratégies semblent fortement corrélées avec les caractéristiques morphologiques et physiques de l'athlète, si l'on en croit les données relevées par Dapéna (1988). Ces différences interindividuelles dans la liaison course impulsion peuvent s'observer à travers la manière dont le sauteur va abaisser son centre de masse pour allonger le chemin d'impulsion, ainsi que la manière dont il va utiliser ses segments libres. Nous définirons les segments libres comme l'ensemble des leviers excentriques par rapport au centre de masse et qui n'entre-

pas en contact avec le sol. Les segments libres principaux du saut en hauteur sont: la jambe libre (celle opposée au pied d'appui), les bras et à un degré moindre la tête.

Trois grandes stratégies sont observables dans la manière d'abaisser son centre de masse (Dapéna et Chung, 1988):

— un premier type d'athlète descend la hauteur du centre de masse très tôt (trois appuis avant l'appel), puis cette hauteur reste constante jusqu'à l'impulsion. La vitesse verticale au début de l'appel reste modérée.

— un deuxième type de sauteur reste relativement haut sur ses appuis pendant toute la course et abaisse le centre de masse uniquement sur le dernier appui. Il en résulte une grande perte de vitesse verticale au début de l'impulsion.

— un troisième type d'athlète a une utilisation de la descente du centre de masse similaire au premier groupe, mais il remonte le centre de masse sur l'avant-dernier appui (jambe opposée à la jambe d'appui).

Les athlètes type 1 et 3 semblent avoir la meilleure utilisation de la prise d'avance des appuis et donc les performances les meilleures. L'utilisation des bras est également différenciée dans cette phase et s'avère fortement corrélée avec le type de stratégies de régulation de la constante de raideur, déjà présente en début de course d'élan.

— Dans le flop amplitude, où le sauteur cherche avant tout à allonger au maximum son chemin d'impulsion grâce à un levier important (longueur du ressort jambe 1), le sauteur soumet son centre de masse à un abaissement important sur l'avant dernier appui (Dapéna, 1980). L'avant dernière foulée est alors plus longue que la dernière. Ce type de sauteur utilise les deux bras pour préparer l'impulsion en les bloquant vers l'arrière dans les trois derniers appuis (Ae *et coll.*, 1986). La vitesse d'arrivée est alors entre 7 et 7,5 m/s.

— Dans le flop vitesse, l'abaissement du centre de masse provient principalement de l'inclinaison latérale due à la course, par manque de force (Peyloz, 1976). Cette inclinaison se fait très tôt, dès l'entrée dans le virage. On y trouve essentiellement les sauteurs de petites tailles qui jouent plus sur la vitesse et sur le paramètre fréquence d'appui pour augmenter la raideur du ressort. Ce style est souvent accompagné d'une utilisation dissociée des bras, ce qui permet une plus grande transmission de vitesse, et diminue les flexions de genoux excessives (Ae *et coll.*, 1986).

On voit donc bien ici que l'hétérogénéité observée dans les angula-

tions des prises d'avances des appuis s'explique par le choix de stratégies d'approche de la barre différentes, essentiellement édictées par les qualités physiques de l'athlète (plutôt rapides ou plutôt forts) et les caractéristiques morphologiques (grands ou petits).

L'impulsion

Le moment clé du Fosbury est l'impulsion qui permet de transformer la vitesse horizontale (V_h) du centre de masse en vitesse verticale (V_v), ou encore de transformer une énergie cinétique acquise dans la course en énergie potentielle gravitationnelle. Le problème essentiel du Fosbury se pose donc dans la phase de transformation de la vitesse horizontale en vitesse verticale, où le centre de masse doit descendre sur les derniers appuis sans perdre de vitesse. Ainsi, à la pose du pied d'appel au sol, la perte de vitesse horizontale est de l'ordre de $-3,9$ m/s et pour la vitesse verticale de $-0,4$ m/s (correspondant à la descente du centre de masse). À la fin de l'impulsion, la vitesse horizontale est de $+4$ m/s et la verticale $+4,4$ m/s (Dapéna et Chung, 1988; Dimitriev, 1986). Pendant toute sa course d'élan, le sauteur cherche à optimiser la constante de raideur pour deux raisons essentielles : optimiser les transferts d'énergies (de cinétique à gravitationnelle), et utiliser au mieux l'élasticité musculaire (préactivation musculaire et réflexe d'étirement).

La problématique de l'impulsion est identique, le sauteur cherche à augmenter le plus possible la raideur du ressort pour aller le plus haut possible. Trois facteurs sont ici déterminants pour augmenter la valeur de k et donc l'élévation maximale du centre de masse : diminuer le temps de contact au sol ainsi que la flexion du genou (Mac Mahon et Cheng, 1990) et augmenter l'angle d'inclinaison au moment de la pose du pied (Farley et Gonzalez, 1996).

La difficulté réside ici dans la gestion de l'interdépendance de ces trois facteurs. Ainsi, si l'on augmente de manière excessive l'angle d'arrivée du pied au sol, il en résultera une augmentation du temps de contact et de la flexion du genou. Une voie de réponse quant à la priorité du facteur régulateur de k à l'impulsion est offerte par l'étude de Ae et coll. (1986). Leur expérience, réalisée sur 10 sauteurs de 2 m à 2,21 m en compétition officielle à Tsukuba (japon) montre que la différence entre le meilleur sauteur et le plus faible est visible à travers leurs capacités respectives à résis-

ter à l'écrasement à l'impulsion. Le vainqueur possède une flexion de genou de 20° à l'appel, passant de 160° à 140° en fin de phase de descente, le début de sa phase d'extension de la jambe se situant 6/100^e de secondes après le début de l'appel. Le sauteur à 2 m possède une flexion de genou à l'appel de 30° , passant de 140° à 110° en fin de phase de descente, le début de sa phase d'extension de la jambe se situant 10/100^e de secondes après le début de l'appel. Il s'écrase donc plus fort et plus longtemps, et ceci explique en partie la différence de performance finale (21 cm).

Il en est de même pour les flexions de cheville, où le vainqueur possède une flexion à l'appel de 50° , passant de 120° à 70° (contre 100° à 60° pour le perdant) en fin de phase de descente, le début de sa phase d'extension de la jambe se situant 6/100^e de secondes après le début de l'appel (contre 10/100^e pour le perdant).

La flexion du genou doit donc être minime, de 160° au début jusqu'à 140° en fin de phase d'amortissement selon Dimitriev (1986). Cette capacité à résister rapidement à l'écrasement à l'impulsion (visible sur les angulations de la cheville et du genou) semble être un critère discriminant quant à la performance finale (Ae et coll., 1986). On peut également penser que le temps plus court de flexion du genou observé chez l'expert est dû à la qualité de la préactivation musculaire, qui permettrait dès lors un raccourcissement de la phase excen-

trique et une transition étirement-contraction plus rapide. Cela contribuerait alors à la mise en place du réflexe d'étirement (Komi et Gollhofer, 1997). Ozolin (1974) précise qu'une flexion exagérée à l'appel nuit à l'efficacité, car elle ne permet pas de tirer profit de l'énergie cinétique accumulée pendant l'élan. Le modèle mécanique de Cavagna et coll. (1977) explique effectivement qu'une raideur trop faible du ressort ne permet pas un transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle gravitationnelle efficace. Une flexion du genou trop importante nuit à cette raideur et donc à la transformation de l'énergie cinétique.

Le rôle des segments libres a ici également un rôle prépondérant et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord, ils influent fortement sur la flexion du genou, mais ont aussi une incidence sur le temps d'impulsion. Leur influence sur la vitesse de décollage (tableau 2) est énorme. Ainsi, l'adduction de la hanche libre par action de lancer-fixe contribue à 56 % à la vitesse de décollage (Luthanen et Komi, 1978). L'utilisation du segment libre permet de créer une rotation longitudinale et d'alléger le corps à l'impulsion et est utilisée de façon identique par tous les sauteurs. Il n'y a donc pas des stratégies motrices différentes dans l'utilisation de ce segment libre. Le rôle des bras est également très important en tant que facteur de performance (Harmann et coll., 1990). Ils peuvent être utilisés de deux manières différentes, ce qui va

Segments	Auteurs	Date	Résultats
Bras	Luthanen, Komi	1978	Contribue à 10 % à la vitesse de décollage
	Harmann et coll.	1990	L'utilisation simultanée des bras et du préappel augmente significativement la hauteur des sauts.
	Dapéna	1980	La vitesse des bras à l'approche varie entre 4 et 12 m/s. L'angle bras/avant-bras idéal est de 90° : ils agissent en accélération-fixation à l'impulsion.
	Ae et coll.	1986	L'utilisation des 2 bras augmente la flexion du genou à l'impulsion. L'utilisation d'un seul bras permet un meilleur transfert de vitesse.
	Luthanen, Komi	1979	L'utilisation des bras dépend du niveau d'expertise : c'est un lancer-bloquer chez l'expert, et une accélération continue chez le débutant.
Genou	Luthanen, Komi	1978	Contribue à 56 % à la vitesse de décollage, par un lancer-fixe en adduction.
Tête	Luthanen, Komi	1978	Contribue à 2 % à la vitesse de décollage

Tableau 2 — Contribution des différents segments libres dans la performance en Fosbury.

avoir une influence sur l'écrasement à l'impulsion (Ae et coll., 1986). On retrouve dans cette action la même différenciation que celle observée lors de la course d'élan ou de la liaison course impulsion (Peyloz, 1976; Pira et Levarlet, 1978).

Les sauteurs qui ont eu une course en amplitude, utilisent plus généralement les deux bras pour impulser. Cela aura comme conséquence des flexions plus importantes au niveau du genou (110° au maximum) et de la cheville (60°), ainsi qu'une durée d'appel plus longue, entre 0,16 et 0,18 s selon Tancic ou 0,22 à 0,24 s selon Peyloz (1976). La durée de l'appel est donc fortement influencée par l'action des segments libres (Diatschkov, 1968).

L'autre catégorie de sauteur, définit ultérieurement comme des sauteurs en vitesse n'utilise qu'un seul bras, celui opposé au pied d'appel, pour fixer son mouvement. Il peut s'agir également de l'épaule ou du coude. Ce type de sauteur utilisant plus la vitesse, a des flexions de cheville et de genou moins importantes à l'impulsion (respectivement 80° et 140° en flexion maximale). Le rôle des bras paraît donc essentiel car il contribue à près de 10 % à la vitesse de décollage (Luthanen et Komi, 1978). D'autre part, c'est le seul segment libre qui peut donner lieu à des stratégies d'utilisation différenciées.

Il est également discriminant quant à l'expertise. En effet, l'utilisation des bras chez l'expert demande une accélération avant l'appel, qui peut aller de 4 à 12 m/s (Dapéna et Chung, 1988), puis une fixation à l'impulsion (Dapéna et Chung, 1988; Luthanen et Komi, 1979). Ce lancer-bloquer demande un timing optimum qui peut permettre un gain d'efficacité de l'ordre de 12 % (Luthanen et Komi, 1978). On peut dire qu'il est optimum, s'il est en phase avec le lancer-bloquer du genou. S'il est déphasé, il contribuera à augmenter le temps d'écrasement. A contrario, les débutants en saut accélèrent le mouvement des segments libres au décollage alors que les experts décélèrent pour fixer à l'impulsion. Les bras contribuent ainsi à l'augmentation de la force verticale (Dapéna et Chung, 1988). Leur efficacité dépend également de l'utilisation simultanée ou dissociée des bras. L'angle bras/avant-bras ne doit pas être trop fléchi et 90° semble être l'angle le plus efficace (Dapéna, 1980). D'autre part, le mode de fixation des bras est fortement corrélé avec le type d'impulsion.

Les conditions initiales de décollage pour les sauteurs qui utilisent les deux bras semblent supérieures quant à la prise d'avance en transla-

tion à celles des sauteurs utilisant un seul bras (Ae et coll., 1986):

- l'angle d'inclinaison antéro-postérieur est de $38,6^\circ$ à $\pm 1,7^\circ$ pour les premiers contre $33,8^\circ \pm 2^\circ$ pour les seconds;
- la vitesse verticale à la pose du pied d'appel est de $-0,28$ m/s à $\pm 0,08$ pour les premiers contre $-0,30$ m/s à $\pm 0,2$ pour les seconds;
- le rapport de la hauteur du centre de masse par rapport à la taille est à la pose du pied d'appel de $48,6\%$ à $\pm 0,5$ contre $49,9\%$ à $\pm 1,5$.

Cependant, les conditions de décollage pour les sauteurs type vitesse, qui n'utilisent qu'un seul bras, sont supérieures quant à la prise d'avance latérale (Peyloz, 1976). Cela alimente encore l'idée d'une équifinalité, où l'on retrouve des modes de compensation interindividuelles pour arriver au même résultat:

- les sauteurs en vitesse utilisent plus la prise d'avance latérale, car en allant plus vite en virage, ils augmentent de manière importante la force centripète;
- les sauteurs en amplitude utilisent plus la prise d'avance en translation et donc la force, jouent beaucoup plus sur le paramètre longueur du ressort l pour réguler la raideur k.

À l'impulsion, l'angle tronc-jambe fait 160° en flop-amplitude (Peyloz, 1976), et l'appel se fait près de la barre, la vitesse horizontale étant faible. L'appel se fait par plante ou talon.

En flop-vitesse, le contact du pied d'appel avec le sol se fait par la plante du pied ou pied à plat. L'angle tronc-cuisse est plus fermé (140°). L'appel est plus éloigné de la barre, à cause de la forte vitesse horizontale.

L'impulsion doit donc être active et si possible avec un alignement pied-bassin-épaule pour une meilleure transmission des forces (Heinz, 1971; Peyloz, 1976; Wagner, 1973, 1974) et la jambe doit réaliser une extension active (Ozolin, 1973). À la fin de l'impulsion, le centre de masse de l'athlète est à une hauteur qui correspond à environ 70 à 75 % de sa taille (Dapéna, 1982). Cela montre l'importance de la hauteur initiale du sauteur. La vitesse verticale à la fin de l'impulsion détermine l'élévation maximale du centre de masse.

L'esquive et la chute

Si la trajectoire du centre de masse est immuable une fois en l'air (Etourneau, 1973; Peyloz, 1976), la position relative des segments peut changer, afin de moduler la vitesse de rotation ou le moment d'inertie. On entend par moment d'inertie la

résistance à la mise en rotation ou à la modification du mouvement de rotation du corps solide autour d'un axe de rotation. Plus la masse est rassemblée autour du centre de masse, plus la vitesse de rotation augmente et le moment d'inertie diminue. C'est ce que l'on appelle le principe de conservation du moment cinétique. À l'appel, le moment d'inertie va être créé par rapport à l'axe longitudinal du corps passant par le pied par l'action des segments libres autour de cet axe. C'est l'action de fléchir puis de fixer le genou libre vers l'intérieur de la courbe qui définit le moment cinétique par rapport à l'axe longitudinal du corps.

Pendant l'esquive, le moment d'inertie est modifié par rapport à l'axe transversal passant par le centre de masse. Il va permettre de réguler la vitesse de rotation autour de la barre. La tirade des genoux vers le haut et l'abaissement des épaules vers le bas pendant l'esquive donnent le moment cinétique par rapport à cet axe.

On peut donc résumer les rotations créées à l'impulsion par l'athlète en fonction de trois paramètres: le moment cinétique, la compensation des segments libres (genoux et bras) et le moment d'inertie.

L'étude vidéo menée par Dapéna (1980a) montre que la hauteur du centre de masse par rapport à la barre peut varier entre 2 et 10 cm. Ceci permet de critérier la qualité du franchissement:

- à plus de 6 cm, il est faible et reste à travailler;
- entre 3 et 6 cm, il s'agit d'un franchissement moyen;
- à moins de 2 cm, il est de très bonne qualité.

Il est à préciser que le sauteur peut tout à fait franchir la barre en ayant le centre de masse en dessous de celle-ci. L'étude de Durey (1997) montre cependant que très peu d'athlètes se trouvant dans ce cas de figure.

Une fois en l'air, le sauteur peut donc augmenter le moment d'inertie, et ainsi diminuer sa vitesse de rotation par rapport à l'axe transversal du corps en éloignant les segments libres du centre de masse.

On retrouve ici également des stratégies d'esquive différentes, également observables à travers la manière dont le sauteur se réceptionne sur le tapis. Elles vont de pair avec le type de saut réalisé:

- En flop-vitesse, le sauteur se réceptionne sur les épaules, avec souvent une culbute arrière involontaire, la chute se faisant loin du point d'appel (Salamon, 1992). Dans ce cas, l'esquive se fait par une dissociation segmentaire entre la ligne

de bassin qui reste parallèle à la barre et la ligne d'épaule qui se tourne (regard compris) vers le coin opposé du tapis. Cela permet de créer un couple de rotation qui va permettre aux jambes de revenir plus vite après le franchissement, par réflexe d'extension croisé. Ce style, qui demande une coordination inter-train difficile à gérer, et qui crée une vitesse de rotation plus importante (Dapéna, 1980) est plus présent chez les sauteurs en vitesse.

— En flop-amplitude, la chute est située dans l'axe de l'appel, parallèlement au sautoir et on observe une élévation du bassin avec une phase de stabilisation au point le plus haut. Le corps reste alors gainé et le moment de rotation est alors uniquement créé par les forces imprimées au sol. Ce type de franchissement est plutôt l'apanage des sauteurs en amplitude (Peyloz, 1976).

On trouve également deux types d'utilisation des bras au-dessus de la barre, sans que cela puisse être mis en rapport avec une typologie de sauteurs. Pendant l'esquive, les bras ont soit un rôle orienteur, un bras longe la barre ou montre le coin opposé du tapis pendant que l'autre est le long du corps, soit un rôle passif: les deux bras restent le long du corps.

Si la chute n'a évidemment aucune incidence sur la performance, il n'en demeure pas moins qu'elle est un moyen d'observation privilégié pour vérifier d'éventuelles fautes techniques. Ainsi, un sauteur qui se retrouve très loin dans le tapis aura réalisé un transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle peu effi-

cace, dans la mesure où il lui reste beaucoup de vitesse horizontale. L'autre faute technique observable grâce à la chute est une ouverture exagérée du pied d'appel à l'impulsion, conséquence d'une rotation précoce. Dans ce cas, le sauteur ne se trouve plus couché dans l'axe de sa course d'élan, mais au contraire, symétriquement opposé, comme s'il venait de l'autre côté du sautoir.

De la même manière, Hackett (1989) précise que la manière dont la barre tombe est un indicateur fiable du type d'erreur commise par le sauteur :

Si la barre part vers le haut puis retombe vers le tapis, trois hypothèses de fautes techniques peuvent être envisagées :

— le sauteur a mis l'impulsion trop près de la barre, il la touche donc en montant et doit reculer ses marques de départ, voire intermédiaires.

— il ne s'est pas assez incliné dans le virage et a donc tendance à fuir vers la barre en montant. Il faut alors voir si le rayon de courbure est adapté aux capacités physiques du sauteur.

— son pied d'appel était trop fermé à l'impulsion, c'est-à-dire que l'angle pied-barre, au lieu d'être de l'ordre de 45° est proche de 0°. Il en résulte une rotation trop précoce amorcée par le genou libre et le sauteur a tendance à se coucher vers la barre. Cela demande un véritable réajustement technique à l'entraînement.

Si la barre saute des taquets pour partir en l'air, trois raisons peuvent également être invoquées :

— une trop grande déperdition de vitesse horizontale, le sauteur n'ayant

pas assez de vitesse pour franchir la barre, et retombe alors dessus ;

— le sauteur était trop loin de la barre à l'appel, et le point le plus haut de son saut est par conséquent à l'avant de la barre. Il retombe donc sur la barre dans la phase descendante de son saut.

— il a donné un coup de postérieur vers le bas au moment du franchissement.

Enfin, si la barre retombe devant le tapis, le sauteur l'a alors touchée avec les mollets ou les pieds. Il s'agit généralement d'un problème de timing dans l'esquive.

Fort de la détermination des principaux facteurs techniques de la performance, on va maintenant chercher à savoir s'il est possible de détecter les qualités de sauteur en hauteur pour un individu donné, voire de prédire sa performance à partir de tests moteurs.

Diagnosics et pronostics des qualités du Fosbury

Le choix des tests moteurs pour prédire la valeur intrinsèque d'un athlète a donné lieu à de nombreux travaux, tant l'enjeu de formation et de détection est grand. Ces travaux ont donné lieu à des résultats discordants (cf. tableau 3). En effet, on trouve une première vague d'auteurs pour qui la corrélation entre les

Auteurs	Date	Type de test	Population testée	Résultat et corrélation avec performance en Fosbury
Young et coll.	1997	Évolutif: appel un et deux pieds sur 1, 3, 5 et 7 pas d'élan	17 garçons	Non mesuré: performance plus importante sur un pied et après 3 foulées
Isaacs	1998	Détente verticale deux pieds	248 garçons, 232 filles de 11 ans	Pas de différence significative entre les tests, qui ont la même fiabilité
Van Coppenolle et coll.	1983	Appel un pied, saut dos à la barre, saut de contrehaut...	27 étudiants en E.P.S.	Très faible
Singer	1976	Détente appel un pied après élan	120 étudiants 88 élèves de 14-15 ans	Significative
		Appel un pied, départ contrehaut (45 cm)	10 athlètes de haut niveau ($m = 2,04$ m)	$r = 0,85$
Ginter	1979	Détente sans élan	Idem	$r = 0,65$
		Appel un pied après élan	Idem	$r = 0,94$
Kuhlow	1977	Appel un pied; détente deux pieds	11 filles de niveau interrégional ($m = 1,79$ m)	Faible
Laffaye	1999	Appel un pied après course d'élan	117 enfants de 13-14 ans	$r = 0,71$

Tableau 3 — Les tests de détection et de prédiction des performances en fosbury et leur fiabilité.

tests moteurs et la performance en Fosbury est importante (Singer, 1976; Ginter, 1979; Laffaye, 1999). Chez d'autres auteurs, les tests n'ont aucune valeur prédictive (Kuhlow, 1977; Van Coppenolle *et coll.*, 1983).

L'hypothèse du choix de la population comme biais à la prédictibilité n'est pas valable. En effet, chez les spécialistes, Singer (1976) trouve une forte corrélation entre test et performance, alors que Kuhlow (1977) n'en trouve pas. Dans une population étudiante, la corrélation étudiée est faible chez Van Coppenolle (1983) et forte chez Singer (1976). Dans une population d'enfants de 13 à 14 ans, les corrélations restent fortes (Singer, 1976; Laffaye, 1999).

Enfin, le type de test n'explique pas non plus la différence de corrélation trouvée. Le test de détente appel un pied après élan est significatif pour Singer (1976), Ginter (1979) et Laffaye (1999), mais pas pour Van Coppenolle *et coll.* (1983).

Seul le test de détente appel deux pieds est consensuel, il n'offre aucune valeur prédictive avec le Fosbury (Isaacs, 1998; Ginter, 1979; Kuhlow, 1977).

Les tests ayant le plus de corrélation avec la performance en Fosbury sont le test d'appel un pied avec élan, celui avec appel un pied départ d'un contre-haut (45 cm) et enfin le test de détente sans élan (Ginter, 1979). Les corrélations respectives sont de 0,94; 0,85 et 0,65. Cependant, il est à noter que ces corrélations ont été obtenues sur des sauteurs de haut niveau (10 athlètes sautant en moyenne 2,03 m), et les corrélations sont faibles sur des populations moins spécialisées d'enfants et d'étudiants (Kuhlow, 1977). Elle montre en effet qu'une telle batterie de tests n'a aucune fiabilité sur une population de 11 filles de niveau national (performance moyenne: 1,79 m). Elle précise que ces tests n'ont aucune valeur prédictive ou diagnostique, contrairement à Laffaye (1999) qui trouve une corrélation de 0,71 entre test de détente après course d'élan et performance en Fosbury sur des enfants de 13 à 14 ans.

Van Coppenolle *et coll.* (1983) ont fait subir une batterie de tests (saut en hauteur dos à la barre, 30 m, saut appel 2 pieds, saut appel un pied départ surélevé, saut appel un pied après course d'élan et saut en longueur sans élan) à 27 étudiants en éducation physique âgés de 19 ans. Les tests montrent une fiabilité minime. Les résultats montrent que pour ce groupe d'étudiants, les tests moteurs n'ont aucune valeur diagnostique et pronostique pour la performance en Fosbury. Les auteurs

concluent en disant que des tests moteurs généraux devraient être plus valables que des tests spécifiques.

Dans une optique similaire, G. Laffaye (1999) a tenté de voir les relations existant entre différentes aptitudes morphologiques – la taille et l'indice skellique (rapport de la longueur des jambes sur la longueur du tronc), aptitude physique (détente appel un pied après élan) et la performance en Fosbury. Cette étude, menée sur 117 enfants de 13 à 14 ans, montre tout d'abord que l'indice skellique n'a pas d'incidence sur la performance. La taille montre par contre une corrélation moyenne ($r = 0,46$). D'autre part, la corrélation entre le test de détente et la performance en Fosbury est de 0,71, résultats plus proches de ceux trouvés par Singer.

Une étude multifactorielle amène la mise en équation de la performance en Fosbury, à visée prédictive et avec une fiabilité importante (erreur-type de 7 cm). Il trouve l'équation suivante:

$$Y = -0,697a + 0,861b + 0,414c + 0,19 \quad (6)$$

Y est la performance en Fosbury, a la taille, b la hauteur maximale touchée de la main et c l'habileté motrice noté de -0,3 à +0,3 en fonction du niveau technique. Cela permet d'inférer sur la performance à partir de deux mesures discrètes, la troisième (l'habileté motrice) demandant déjà une observation armée du Fosburyste, mais qui peut être annulée dans la formule si l'on n'a pas les moyens de cette observation. Cela prédit dès lors la performance en jugeant le sauteur comme étant d'un niveau technique très moyen.

Ces différents tests proposent un protocole facile à mettre en place et offrent des perspectives pragmatiques. Des modèles plus complexes, basés sur des modélisations mathématiques, après numérisations informatiques de données vidéos, permettent de savoir par simulation la hauteur réelle du centre de masse de l'athlète.

Dapena (1980) offre, par la qualité de ses simulations tridimensionnelles, la possibilité de connaître exactement la hauteur du centre de masse pendant le franchissement du sauteur. Cela permet par la suite d'inférer sur la valeur du franchissement de l'athlète en comparant sa performance réelle et celle prédite par la simulation informatique.

On voit donc ici que les tests de détection, de prédiction ou d'enregistrement d'aptitudes liés au saut en hauteur vont du pragmatisme empirique aux simulations algorithmiques les plus complexes. Les

résultats, quant à eux, sont souvent contradictoires entre les auteurs et montrent la difficulté de la mesure et de son interprétation.

Blessures et entraînement: état des lieux et prévention

Dans un souci d'une étude exhaustive du saut en hauteur en Fosbury, la littérature abonde de comptes médicaux de blessures typiques de cette activité, que l'on peut classer et analyser. Le but de cette partie n'est pas de constater des blessures exceptionnelles ou atypiques, mais au contraire de recenser les blessures caractéristiques, qui peuvent survenir lors de l'entraînement ou la compétition dans la pratique du Fosbury-flop et d'offrir certaines voies de prévention. Les principales blessures et leurs remédiations possibles sont synthétisées dans le tableau 4.

Les fractures de fatigue toucheraient particulièrement les sauteurs. Une étude longitudinale menée sur 5 ans par Geyer *et coll.* (1993) sur 70 athlètes, a permis de recenser les différentes populations de sportifs atteints de fractures de fatigue. La population, âgée de 22 ans en moyenne, montre la répartition suivante des fractures en fonction des sports pratiqués: 42 % d'athlètes sont concernés, 13 % de gymnastes et 7 % de footballeurs. Les formes les plus courantes de fractures sont celles du tibia (41 %), du tarse (30 %), du plat du pied (25 %). Les causes invoquées par les médecins sont à 37 % le surentraînement, et on constate que 33 % de ces fractures sont liées à des activités de sprint ou de sauts.

Les parties du corps les plus soumises à la blessure sont les chevilles, les genoux et le cou, comme le montre le tableau 4.

La cheville est ainsi soumise à rude épreuve, notamment dans les atterrissages dans les séquences de multisauts (Stacoff *et coll.*, 1990; Gross *et coll.*, 1988; Brizuela *et coll.*, 1997).

Différents mouvements de torsion du pied se produisent dans l'atterrissage après le saut. Quel que soit le type d'impulsion (un ou deux pieds), le problème posé par l'atterrissage est lié aux distorsions dues au grand moment pendant lequel le pied résiste à l'écrasement (Stacoff *et coll.*, 1990). Avec l'utilisation de semelles, la torsion est moindre, et cela permet une plus grande

Partie corporelle	Auteur	Date	Blessure constatée	Cause et/ou remédiation
Jambe et pied	Geyer et coll.	1993	Fractures de fatigue analysées sur 5 ans: 42 % d'athlètes concernés, dont 41 % au tibia et 30 % au tarse.	Les causes sont à 37 % le surentraînement. 33 % de ces blessures sont survenues sur des sprints ou des sauts.
	Stacoff et coll.	1990	Torsion du pied lors des atterrissages.	L'utilisation de semelle diminue cette torsion
	Gross, Nelson	1988	Choc de la cheville à l'atterrissage.	Le changement de la surface ne change rien
	Brizuela et coll.	1997	Entorses aux chevilles.	Utilisation de chaussures de 2 types: le modèle montant avec amorti réduit les blessures, augmente les chocs et diminue les performances.
	Geyer et Siebert	1991	Hyperéversion de la cheville à l'impulsion.	L'hyperéversion est réduite de 77 % par le strapping et le long péronier donne 30 % d'efficacité en plus.
Le cou	Paly et Gillespic	1986	Blessures chroniques.	Répétitions des flexion-rotations lors de la réception amènent des subluxations de C5, C6 et C7.
	Cheshire	1969	Subluxation chronique.	Instabilité cervicale à long terme de 29 %.

Tableau 4 – Les différents types de blessures en Fosbury-flop, leurs causes et/ou leurs remédiations.

stabilité, diminuant ainsi le risque de blessures.

Le rôle de la surface du sol sur l'atténuation des chocs subis par la cheville à l'atterrissage semble négligeable (Gross et Nelson, 1988). L'enregistrement par électromyographie et vidéo montre que le pic de force ainsi que le mouvement de la cheville varie peu avec la qualité de la surface. Une autre voie de remédiation passe par le choix de la chaussure d'entraînement (Brizuela et coll., 1997). Ces chercheurs ont comparé deux types de chaussures sur les risques de blessures liés aux sauts verticaux et aux courses d'obstacles. Les deux modèles en concurrence sont un modèle high-tech montant avec amorti au talon et un modèle bas sans amorti (ni air, ni gel).

Les tests montrent que le modèle high-tech réduit les éventuelles blessures de chevilles, mais augmente les transmissions de chocs au niveau des articulations et réduit de manière notable les performances de détente et de vitesse.

Au saut en hauteur, les problèmes de blessures peuvent survenir sur des entraînements d'impulsion et notamment à la réception, mais également lors de l'appel, où l'hyperéversion de la cheville amène des traumatismes divers.

Mais l'hyperéversion de la cheville à l'impulsion peut être réduite de 77 % par l'utilisation de strapping (contention rigide autour de la cheville), selon Geyer et Siebert (1991). Le temps de l'éversion est également réduit de 33 % et le temps d'éversion maximale de 8 %. L'enregistrement électromyographique montre une augmentation du rôle du muscle long péronié de 30 %, l'activité des autres muscles changeant peu.

Les problèmes de genoux, s'ils sont fréquents chez les Fosburyistes, n'ont pas donné lieu à une littérature abondante, car liés à des traumatismes bénins, bien que chroniques (tendinite sous rotulienne par exemple).

La partie du corps paraissant la plus anodine est le cou du sauteur, celui-ci est pourtant soumis à rude épreuve lors des réceptions sur le matelas (Cheshire, 1969; Olin et coll., 1982; Paley et Gillespic, 1986; Roaf, 1960; Sher, 1978; White et coll., 1975).

Ainsi, les blessures chroniques du cou sont fréquentes chez les Fosburyistes, à cause des répétitions des flexions-rotations des vertèbres cervicales lors de la réception. Paley et Gillespic (1986) ont dénombré de nombreuses subluxations des vertèbres C5, C6 voire C6, C7 (de l'ordre de 57 %).

Ceci est essentiellement dû à l'enchaînement répété de la chute successive dos-épaules-cou chez les sauteurs, voire directement épaules-cou chez certains autres.

Cheshire (1969) a montré que ce type de subluxation chronique amène une instabilité cervicale à long terme de l'ordre de 29 %.

Ces types de blessures, parfois anodines voire non décelées, doivent être pris en compte par les entraîneurs afin de préserver l'intégrité corporelle de l'athlète.

Conclusion

Pour conclure, nous retiendrons le rôle primordial occupé par la mécanique quant à la compréhens-

sion de la technique du Fosbury, qui a offert, 30 ans durant, un modèle rationnel pour expliquer le coup de génie de Dick Fosbury aux jeux Olympiques de 1968 à Mexico. Le modèle du sauteur assimilé à un système simple masse-ressort permet à plus d'un titre la compréhension des facteurs déterminants dans la performance, notamment dans le transfert d'énergie cinétique en énergie potentielle.

On retiendra également la place laissée dans cette activité techniquement très contraignante à l'expression des individualités, perçue à travers les différentes stratégies de course d'élan, d'utilisation des segments libres et d'esquive. Chaque morphotype peut trouver une solution liée à ses capacités individuelles et explicable par les paramètres régulateurs de la constante de raideur du ressort.

D'autre part, les diverses tentatives de mise en place de tests de détection ou de prédiction pour le Fosbury ne semblent pas encore offrir un consensus suffisant. On peut penser que le critère le plus explicatif de ce phénomène est le côté invisible dans la gestion de cette activité (motivation, stress de la compétition).

Les travaux en médecine et traumatologie ont permis de prévenir les blessures du sauteur, de la cheville au cou, en passant par les problèmes de genoux. Les moyens d'intervention sont relativement consensuels, contrairement aux analyses explicatives, qui n'offrent aujourd'hui aucun paradigme valable, surtout dans le domaine de la neurophysiologie.

Trente ans d'analyse et d'étude sur le saut en hauteur ont permis d'en comprendre les mécanismes

intimes, d'en expliquer les rouages, même si parfois la liaison entre les travaux scientifiques et leurs utili-

sations par les entraîneurs ou les enseignants est délicate. D'autres travaux, comme l'utilisation de test

de détection sont au contraire très peu consensuels sur le terrain et en laboratoire.

Bibliographie

- ADACHI N T, ASAMI H, TOGARI T, KIKUCHI, SANO Y (1973) An analysis of movement in backward-roll style high jump. *Proc. Dept Phys. Ed. Univ. Tokyo* 7: 69-75.
- AE M, SAKATANI Y, YOKOI T, HASHIHARAY, SHIBUKAWA K (1986) Biomechanical analysis of the preparatory motion for take off in the Fosbury flop. *Int J Sport Biomech* 2 (2): 66-77.
- ALEXANDER R M, VERNON A (1975) Mechanism of hopping by Kangaroos (macropodidae). *J Zool London* 177: 265-303.
- ALEXANDER R M (1984) Walking and running. *Am scientist* 72: 348-354.
- ANDERSON FC, PANDY MG (1993) Storage and utilization of elastic strain energy during jumping. *J biomech* 26 (12): 1410-1427.
- ANZIL F, BRAGAGNOLO V, ZANON S (1973) Die Lage der letzten Fusspuren bei bogenförmigen Flop-anlauf. *Die Lehre der Leichtathletik* 51-52: 1828-1830.
- ARAGON-VARGAS LF, GROSS MM (1997a) Kinesiological factors in vertical jump performances: Differences among individuals. *J Appl Biomech* 13 (1): 24-44.
- ARAGON-VARGAS LF, GROSS MM (1997b) Kinesiological factors in vertical jump performances: Differences within individuals. *J Appl Biomech* 13 (1): 45-65.
- AURA O, VIITASALO JT (1989) Biomechanical characteristics of jumping. *Int J Sport Biomech* 5 (1): 89-98.
- BEULKE H (1973) Der physikalische Sinn des bogenförmigen Anlaufs beim Fosbury-flop. *Die Lehre der Leichtathletik* 51-52: 1820-1824.
- BOBBERT MF, HUIJING PA, VAN INGEN SCHENAU GJ (1987) Drop jumping. The influence of jumping technique on the biomechanics of jumping. *Med sci sports exerc* 19 (4): 332-338.
- BOSCO C, LUHTANEN P, KOMI PV (1983) A simple method for measurement of mechanical power in jumping. *Eur J Appl Physiol* 50 (2): 273-282.
- BRIZUELA G, LLANA S, FERRANDIS R, GARCIA BELENGUER AC (1997) The influence of basketball shoes with increase ankle support on shock attenuation and performance in running and jumping. *J Sports Sci* 15: 505-515.
- CAVAGNA GA (1977) Storage and utilization of elastic energy in skeletal muscle. *Exerc Sport Sci Reviews* 5: 89-129.
- CAVAGNA G A, SAIBENE F P, MARGARIA R (1964) Mechanical work in running. *J Appl Physiol* 19 (2): 249-256.
- CHESHIRE DJE (1969) The Stability of the cervical Spine following the conservative treatment of fractures. *Paraplegie* 7: 193-203.
- COOKSEY S (1986) Teaching Progression of the Flop. *Track and Field Quarterly* 86 (4): 36-37.
- DAPENA J (1980a) Mechanics of translation in the Fosbury-flop. *Med Sci Sports Exerc* 12: 37-44.
- DAPENA J (1980b) Mechanics of rotation in the Fosbury-flop. *Med Sci Sports Exerc* 12: 45-53.
- DAPENA J, CHUNG CS (1988) Vertical and radial motions of the body during the take-off phase of high jumping. *Med Sci Sports Exerc* 20: 290-302.
- DAPENA J (1980c) The Fosbury-flop technique. *Track and Field Quarterly Review* 80 (4): 22-27.
- DIMITRIEV V (1986) The Fosbury flop: basic structure of the take off. *Soviet sports review* 21 (4): 167-171.
- DOHERTY K (1980) The rule in the high jump. A historical approach. *Track and Field Quarterly Review* 80 (4): 28-33.
- DOWLING JJ, VAMOS L (1993) Identification of kinetic and temporal factors related to vertical jump performance. *J Appl Biomech* 9: 95-110.
- DUREY A (1997) Physique pour les sciences du sport. Masson (Ed).
- DYATCHKOV VM (1968) The high jump. *Track Technique* 34: 1059-1075.
- DYSON (1965) Principes de mécanique en athlétisme -Éditions Vigot Frères, Paris.
- ETOURNEAU (1973) Le Fosbury flop: essai pour une étude du système. A.E.F.A. 39.
- FARLEY CT, GONZALEZ O (1996) leg stiffness and human frequency in human running. *J Biomech* 29: 181-186.
- FIX (1974) Contributing variables to high jumping. *Track and Field Quarterly review* 74 (1): 15-16.
- FORTUIN (1974) Biomechanische karakteristieken van de verticale opsprong- K.U.L. Instituut voor Lichamelijke Opvoeding, Laboratorium voor biomechaniek: 7-11 et 15-17.
- FOWLER NE, TRZASKOMA Z, WIT A, ISCKRA L, LEES A (1995) The effectiveness of a pendulum swing for the development of leg strength and countermovement jump performance. *J Sports Sci* 13 (2): 101-108.
- FOZO C (1977) Analyse cinématographique de la biomécanique du saut en hauteur. *Testnevels-es sportdomanyos kozlomenyek* 1: 135-147.
- FUKASHIRO S, KOMI PV, JARVINEN M, MIYASHITA M (1995) In vivo achilles tendon loading during jumping in humans. *Eur j appl physiol* 71 (5): 453-458.
- GEYER M, SIEBERT WE (1991) complex movement analysis: dynamic study of the effect of a tape bandage on pronation in high-jumping with 3D movement analysis and electromyography. *Sportverletz sportschaden* 5 (2): 103-107.
- GEYER M, SANDER-BEUERMANN A, WEGNER U, WIRTH CJ (1993) stress reaction and stress fracture in the high performance athlete. Causes, diagnosis and therapy. *Unfallchirurg* 96 (2): 66-74.
- GINTER KD (1979) Trainingsbegleitenden Tests beim flop zur feststellung von trainingsschwerpunkten. *Leistungssport* 9 (5): 323-330.
- GIROUARD Y, DESSUREAULT J, FERLAND P, LAFORTUNE M (1981) Double approach to the study of high jumping: attention demands and biomechanics. *Can j Appl sport Sci* 6 (3): 126-131.
- GROSS TS, NELSON RC (1988) The shock attenuation role of the ankle during landing from a vertical jump. *Med Sci Sports Exerc* 20 (5): 506-514.
- HACKETT B (1989) Analysis of the highjump crossbar in failed attempt. *Track technique* 107: 3409-3411.
- HARMAN EA, ROSENSTEIN MT, FRYKMAN PN, ROSENSTEIN RM (1990) The effects of arms and countermovement on vertical jumping. *Med Sci Sports Exerc* 22: 825-833.
- HEINZ (1971) Der bogenförmige Anlauf beim Fosburyflop. *Leichtathletik* 6.
- HIGGINS (1974) Back-Layout High Jumping. Ontario Track and Field Association, édité par Radford: 5-17.
- HOFFER JA, ANDREASSEN S (1981) regulation of soleus muscle stiffness in prenamillary cats. Intrinsic and reflex components. *J Neurophysiol* 45: 267-285.
- HUMPHREY S (1986) High Jump. The Back Layout. *Track and Field Quarterly* 86 (4): 32-35.
- INGEN SCHENAU GJ VAN (1984) An alternative view of the concept of utilization of elastic energy in human movement. *Hum Mouvement Sci* 3: 301-336.
- INGEN SCHENAU GJ VAN, BOBBERT MF, DE HAAN A (1997) Does elastic energy enhance work and efficiency in the stretch shortening cycle? *J Appl Biomech* 13 (4): 389-415.

- ISAACS LD (1998) Comparison of the vertec and just jump systems for measuring height of vertical jump by young children. *Percept mot skills* 86 (2): 659-663.
- JACOBY E (1986) High Jump. A Technique Evaluation. *Track Technique* 97: 3089-3093.
- KERSSENBRÖCK K (1975) Klíčové prvky v technice zadového způsobu. I. *Atletika* 6: 20-30.
- KIOPARA I, AE M (1977) The straddle versus the Fosbury-flop: Merit and demerit. *Track and Field Magazine* 27 (13): 154-158.
- KINPARA L, AE M., OONISHI A, TAKAMATSU K (1975) Experimental study on approach run and preparation for take off of highjumping. Research Report of Sports Science: Improvement of jumping ability (2nd report), Japan Amateur Athletic Association: 61-82.
- KOMI PV, BOSCO C (1978) Utilization of stored elastic energy in leg extensors by men and women. *Med Sci Sports Exerc* 10: 261-265.
- KOMI PV (2000) Stretch shortening cycle: a powerful model to study normal and fatigued muscle. *J Biomech* 33 (10): 1197-1206.
- KOMI PV, GOLLHOFER A (1997) stretch reflex can have an important role in force enhancement during SSC-exercise. *J Appl Biomech* 13: 451-460.
- KUHLOW A (1977) Bewegungsdiagnostische bestimmung konditioneller und technomotorischer leistungskomponenten bei vertretern von schnellkraftdisziplinen- ein Beitrag zur optimierung des sportmotorischen leistungstandes im hochsprung der frauen. *Leistungssport* 7 (5): 405-419.
- LAFFAYE G (1999) Saut en hauteur en Fosbury et aptitude: étude de corrélations sur des enfants de 13-14 ans. Mémoire de D.E.A., non publié. L.I.R.E.S.T., E.N.S. Cachan.
- LABESCAT C (1972) An interpretation of Fosbury technique. The Jumps. Ed. Fred wilt, Tafnews Press, Los Altos, Ca.: 19-23.
- LEVINE WS, CHRISTODOUBU M, ZAJAC FE (1983) On propelling a rod to a maximum vertical or horizontal distance. *Automatica* 19 (3): 321-324.
- LUHTANEN P, KOMI PV (1978) Segmental contributions to forces in vertical jump. *Eur J Appl Physiol* 38: 181-188.
- LUHTANEN P, KOMI PV (1979) Mechanical power and segmental contribution to force impulses in long jump take-off. *Eur J Appl Physiol* 41 (4): 267-274.
- MAC EWEN (1972) The Jumps: The High Jump take-off. Ed F. Wilt.
- MAC MAHON TA, VALIANT G, FREDERICK EC (1987) Groucho running. *J Appl Physiol* 62: 2326-2337.
- MAC MAHON TA, CHENG GC (1990) The mechanics of running: how does stiffness couple with speed? *J Appl Biomech* 23 (1): 65-78.
- MATSUI H, MIURA M, OGURI T, SODEYAMA H, MARUYAMA K, KOKAGE S (1975) Lay-out position of the Fosburyflop. Research Report of Sports Science: Improvement of jumping ability (2nd report), Japan Amateur Athletic Association: 20-26.
- MILANI T, HENNIG EM (1996) Druckverteilungsmuster unter dem Fuss beim absprung zum Fosbury-flop hochsprung, *deutsche zeitschrift für sportmedizin* 47: 371-376.
- MYERS B. Mechanics of the High Jump, TAC Level II Coach Certification Manual: 1-5.
- NIGG B, WASER J, BIBER T (1974) Hochsprung. Spring, Springen Sprünge. Ed. Benno Nigg.: 75-104.
- NOSZALY (1973) L'analyse biomécanique du saut de Major. A.E.F.A. 39.
- OLIN MS, YOUNG HA, SELIGSON D, ET AL (1982) An unusual cervical injury occurring during cow milking- *Spine* 7: 514-515.
- OZOLIN N (1973) The high jump takeoff mechanism. *Track Technique* 52: 1668-1671.
- OZOLIN N (1981) The Mechanics of the High jump Take-Off. The jumps. Los Altos, California, *Track and Field News Press*: 36-39.
- OZOLIN (1974) Mécanique de l'appel. A.E. F.A. 42.
- PALEY D, GILLESPIE R (1986) Chronic repetitive unrecognized flexion injury of the cervical spine (high jumper's neck). *Am J Sports med* 8 (1): 5-9.
- PANDY MG, ZAJAC FE (1989) Dependence of jumping performance on muscle strength, muscle-fiber speed, and tendon compliance. in J.L. Stein, J.A. Ashton-Miller, & M.G. Pandy (Eds.), Issues in the Modelling and Control of Biomechanical Systems, 1989 ASME inter Annual Meeting in San Francisco. New York: *Am Soc Mech Eng* 17: 56-63.
- PANDY MG, ZAJAC FE, SIM E, LEVINE WS (1990) An optimal control model for maximum-height human jumping. *J Biomech* 23 (12): 1185-1198.
- PANDY MG, ZAJAC FE (1991) Optimal muscular coordination strategies for jumping. *J Biomech* 24 (1): 1-10.
- PAOLILO B (1989) Why use a curved approach in the flop jump? *Modern athlete and coach* 27 (1): 19-20.
- PEYLOZ H (1976) Les sauts. Éditions Amphora: 7-9, 173-177, 200-224, 232-271.
- PIRA AM, LEVARLET JH (1978) étude comparative du flop-vitesse et du flop-amplitude. *Sport Belgique* 21 (1): 2-11.
- REID P (1986) Approach and Take-off for the Back Layout High jump. *National Strength Coaches Association locimal* 8 (1): 5-9.
- RITZDORF W (1985) Zur technischen vorbereitung des Flop. *Lhere der leichtathletik* 5: 1785.
- ROAF R (1960) Study of the mechanics of spinal injuries. *J Bone Joint Surg* 426: 810-832.
- SALAMON H (1992) Fosbury: le franchissement de la barre. *Revue E.P.S* 234: 77-82.
- SEKIOKA Y, KURIHARA T (1978) The effect of curved approach in running high jump. *Bulletin of institute of health and sport science*: 77-86.
- SCHER AT (1978-1979) Injuries to the cervical spine sustained while loads on the head. *Paraplegia* 16: 94-101
- SCHNOTER G (1981) Corrections of Flop Faults. The jumps. Los Altos, California. *Track and Field News Press*: 50-53.
- SINGER (1976) In VAN COPPENOLLE H, BOETHS W, GORIS M, VAN CAFELGHEM (1983). Der diagnostische und pronostische wert einzelner sportmotorischer tests für den Fosbury-flop. *Lehre der leichtathletik* 58: 179-183.
- SIPES M (1977) Mechanics of the flop. *Track technique* 68: 2173-2175.
- STACOFF A, KALIN X, STUSSI E, SEGESESSER B (1990) Torsion movement of the foot in landing after a jump. *Z Orthop Ihre Grenzgeb* 128 (2): 213-217.
- STEINER-EBENHOH-KNEBEL (1970) Flop- Technik und flihkraft. *Leichtathletik* 27.
- STIMBRE (1972) Enseignement du flop et ses problèmes. A.E.F.A. 36.
- TANCIC C in PIRA AM, LEVARLET JH (1978) étude comparative du flop-vitesse et du flop-amplitude. *Sport Belgique* 21 (1): 2-11.
- TOWNSEND MA (1973) A relationship between muscle performance when producing and absorbing work. *J Biomech* 6: 261-265.
- VAN COPPENOLLE H, BOETHS W, GORIS M, VAN CAFELGHEM (1983) Der diagnostische und pronostische wert einzelner sportmotorischer tests für den Fosbury-flop. *Lehre der leichtathletik* 58: 179-183.
- VINT PF, HINRICHS RN (1996) Differences between on foot and two-foot vertical jump performances. *J Appl Biomech* 12 (3): 338-358.
- VOIGHT M, SIMONSEN EB, DYHRE-POULSEN P, KLAUSEN K (1995) Mechanical and muscular factors influencing the performance in maximal vertical jumping after difference prestretch loads. *J Biomech* 28 (3): 293-307.
- WAGNER (1973) Fosbury-Flop. A.E.F.A. 38.
- WAGNER (1974) The Fosbury: Flop High Jump Style. *Track and Field Quartely Review* 74 (1): 8-13.
- WALSHE AD, WILSON GJ (1997) The influence of musculotendinous stiffness on drop jump performance. *Can j appl physiol* 22 (2): 117-132.
- WEBB JK, BROUGHTON RBK, MCSWEENEY T, ET AL (1976) Hidden flexion injury of the cervical spine. *J Bone Joint Surg* 58B: 323-327.

WALTON JS (1979) Close-range cinematography: An other approach to motion analysis. In J. Terauds. *Sci Biomech Cinem*: 69-97.
 WHITE M, JOHNSON RM, PANJABI MM, ET AL (1975) Biomedical analysis of clinical stability in the cervical spine. *Clin Orthop* 100: 85-96.
 WOICIL M (1983) High jump: Flop technique. *Track and Field Quarterly Review* 83 (4): 27-30.
 XINGWANG F (1986) An Analysis of Zhu jianhua's Run-Up Technique. *Track and Field Quarterly* 86 (4): 38-41.

YOUNG JS, CHESHIRE OJE, PIERCE JA, ET AL (1977-1978) Cervical ankylosis with acute spinal cord injury. *Paraplegia* 15: 133-146.

YOUNG W, MACDONALD C, HEGGEN T, FITZPATRICK J (1997) An evaluation of the specificity, validity and reliability of jumping tests. *J sports med phys fitness* 37 (4): 240-245.

ZAJAC FE (1993) Muscle coordination of movement: A perspective. *J Biomech* 26 (S1), 109-124.

Abstract – G. LAFFAYE (2001) Fosbury-flop and performance's factors: a review. *Science et motricité* 42: 3-15. Performance's factors in high-jump are manifold. The analysis of highjump explained the curved approach and rotatory torque lift off. This analysis shows that the use of different segments (arm, knee) of each athlete depend upon their morphologies and physical qualities. The quality of the transfert of kinetic energy in potential is a main performance's factor. A simple spring-mass model is used to explain the parameters of the performance, like the stretch shortening cycle. Some researches in performance's prediction don't show a real consensus. The problem is based on pertinency of the choice of motor's tests.

Lastly, a limit of the progress result of the risk of injuries, by the repetitions of shocks, during take-off phase.

Key-words: Hopping / Jump / Bouncing / Detection / Training.
