

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/233866850>

# Les facteurs de la performance en saut à la perche dans la littérature scientifique

Article in Staps · May 1993

---

CITATIONS  
3

READS  
1,773

---

2 authors:



Philippe Vaslin

Université Clermont Auvergne

148 PUBLICATIONS 556 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Mariano Cid

Université Bordeaux 1

72 PUBLICATIONS 891 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Project Methodological aspects to study manual wheelchair biomechanics [View project](#)



Project Swimming turns [View project](#)

# Les facteurs de la performance en saut à la perche dans la littérature scientifique

P. VASLIN \* et M. CID \*\*

## RÉSUMÉ

Le saut à la perche est une discipline athlétique qui a fait l'objet de nombreux travaux scientifiques, surtout depuis ces trente dernières années et l'avènement de la perche en fibre de verre. Tous les auteurs ont cherché à identifier les facteurs de la performance en saut à la perche, soit au travers d'études expérimentales, basées sur l'analyse cinématique du geste, soit au moyen de simulations informatiques, basées sur des modèles mathématiques ou physiques du mouvement. Après regroupement sous des dénominations génériques, un total de 25 paramètres, indépendants ou non, a été recensé. Parmi ceux-ci, 13 ont été identifiés par au moins deux auteurs et ont fait l'objet de conclusions similaires, 4 ont fait l'objet de conclusions opposées, et 8 n'ont été identifiés que par un seul auteur. Sur les quatre facteurs controversés, trois mettaient en opposition les résultats d'une étude expérimentale avec ceux d'une ou plusieurs méthodes de simulation. La conclusion de cet article ne remet pas en cause l'intérêt fondamental des méthodes de simulation pour l'optimisation de la performance en saut à la perche, mais précise que celles-ci doivent tenir compte de l'interdépendance de certains paramètres dans le but de conserver un lien étroit avec la réalité du saut et d'être utilisées sur le terrain en tant qu'outils efficaces pour l'entraînement.

**Mots clés :** saut à la perche, biomécanique, analyse bibliographique, analyse cinématique, simulation informatique.

\* Faculté des Sciences du sport et de l'éducation physique – Université Bordeaux II – Avenue Camille Jullian – 33404 Talence Cedex.

\*\* Laboratoire de mécanique physique – U.R.A. 867 du CNRS – Université Bordeaux I – 351, cours de la Libération 33405 Talence Cedex

---

ABSTRACT

---

*The pole vault is a track and field event which has been the purpose of many scientific studies, especially during the last thirty years and with the coming of the fiberglass pole. All the authors attempted to identify the factors of performance in pole vaulting, either through experimental studies, based on movement kinematic analysis, or by the mean of simulation methods, based on mathematical or physical models. After grouping them under generic designations, a set of 25 parameters, either independent or not, related with the performance in the pole vault, has been registered.*

*Among these, 13 have been identified by at least two authors and were the object of similar conclusions, 4 were the object of opposed conclusions, and 8 were identified by only one author. Among the 4 debated factors, 3 opposed the results of an experimental study with those of one or more simulation methods. The conclusion of this paper does not question the fundamental interest of simulation methods in the optimization of the performance in the pole vault, but precises that they must take into account the interdependence of some parameters in the aim of keeping a tight bond with the actuality of the vault and being used on the field as effective tools for training.*

**Key words :** *pole vault, biomechanics, bibliographical analysis, kinematic analysis, computer simulation.*

## INTRODUCTION

L'avènement de la perche en fibre de verre au plus haut niveau international remonte à 1961, lorsque l'Américain George Davies battit le record du monde du saut à la perche (4,83 m), précédemment détenu par son compatriote Donald G. Braggs (4,81 m) avec une perche métallique. Mais il fallut attendre 1962 et le record symbolique de John Uelses (16 pieds  $\approx$  4,88 m) pour que ce type de matériel soit universellement reconnu et commence à remplacer les anciennes perches en acier suédois. Depuis cette époque, le record du monde n'a cessé de progresser (figure 1) et l'emploi de la perche en fibre de verre s'est généralisé, d'abord chez les meilleurs spécialistes mondiaux de la discipline, et aujourd'hui dans tous les clubs d'athlétisme.

Les avantages liés à l'utilisation d'une perche souple, par rapport à une perche rigide, ont été étudiés par de nombreux chercheurs en biomécanique au cours des trente dernières années. Tous ne se sont pas intéressés aux mêmes facteurs de la performance, et si l'on considère leurs études indépendamment les unes des autres, il n'est pas

facile d'en faire ressortir les caractéristiques communes. Nous nous sommes donc attachés à essayer de faire la synthèse des principaux travaux publiés sur le sujet depuis 1960, dans différentes revues scientifiques nationales ou internationales. Notre motivation était de fournir aux entraîneurs, enseignants ou athlètes, des éléments **objectifs**, mis en évidence par une démarche scientifique, afin de leur permettre, suivant les cas :

- de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu au cours du saut ;
- d'établir des programmes d'entraînement adaptés aux capacités physiques et techniques des athlètes dont ils ont la charge ;
- de proposer à leurs élèves, débutants ou confirmés, des exercices d'apprentissage basés sur des résultats scientifiques objectifs, et non plus seulement sur des considérations empiriques ou des sensations personnelles, fortement teintées de subjectivité.

Notre analyse a porté sur quatorze études successives<sup>1</sup>, effectuées par douze auteurs

1. Les travaux de J. Morawski *et col.* (1977) ont été scindés en deux afin de distinguer, d'une part, le modèle mathématique utilisé et, d'autre part, la méthode de simulation.

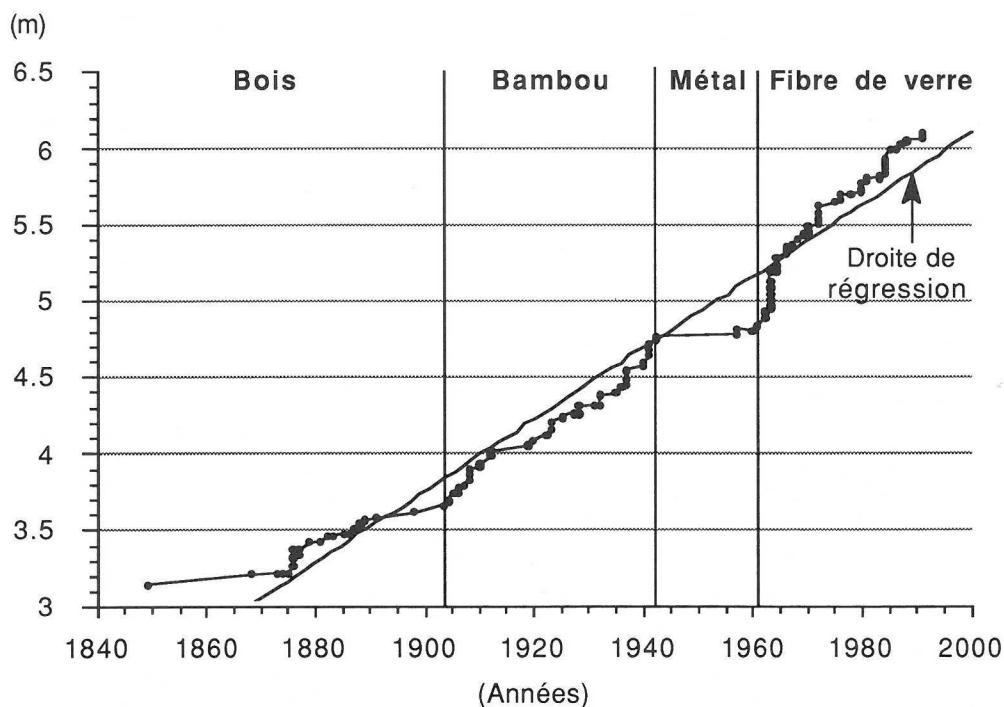


FIG. 1. – Evolution du record du monde de saut à la perche.

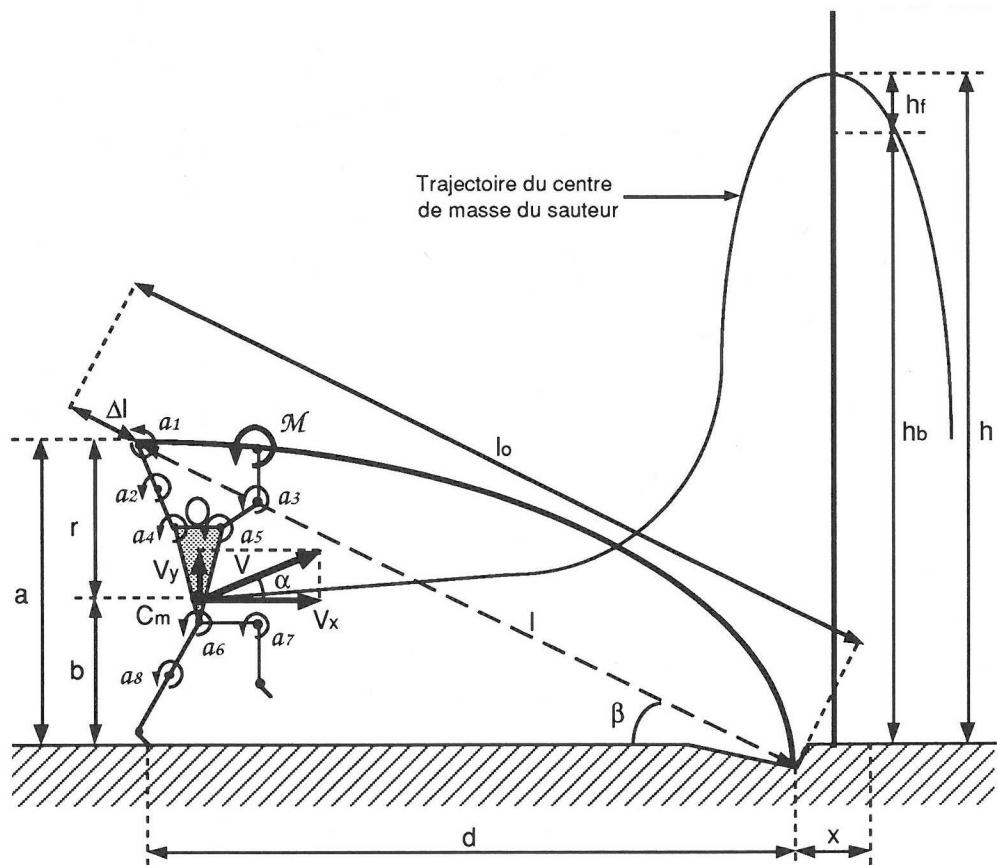
différents, parmi les principaux ayant publié des articles sur le sujet. Ces travaux recouvriraient deux types d'approches différentes :

- a – Des études expérimentales basées sur l'analyse cinématique de sauts réels et en référence à des modèles particuliers de représentation de la perche et du sauteur, ainsi qu'à un modèle mathématique explicatif de la performance (physique, mécanique ou énergétique) ;
- b – Des simulations sur micro-ordinateur, également basées sur des modèles de la perche et du sauteur, et dont les résultats se traduisaient à l'écran par le traçage des courbes de trajectoires, de vitesses et d'accélérations du centre de masse du sauteur. Ces courbes étaient calculées à partir des valeurs initiales, à l'instant du décollage<sup>2</sup>, des paramètres

de la performance pris en compte par le modèle mathématique intégré dans la méthode de simulation utilisée.

Afin de présenter les résultats de ces études sous forme synthétique, il a été nécessaire de regrouper les facteurs de la performance identifiés (figure 2) sous des dénominations génériques, dans le but de masquer les différences d'appellation d'un auteur à l'autre. Suite à cette approche, nous avons dénombré 25 paramètres, indépendants ou non, liés à la performance en saut à la perche, dont certains font la quasi-unanimité, alors que d'autres sont plus ou moins controversés. Ces paramètres sont regroupés dans le tableau 1, où les signes (+) et (-) indiquent si le facteur considéré est favorable ou non à une meilleure performance du sauteur, du point de vue de l'auteur de l'étude.

2. L'instant du décollage correspond au début du premier intervalle de temps où le pied d'appel du sauteur n'est plus en contact avec le sol. La largeur de cet intervalle dépend de la fréquence d'enregistrement du film expérimental (25, 50, 64 ou 100 images par seconde) ou du pas de temps choisi par l'auteur d'une méthode de simulation (1/100 ou 1/1000 de seconde).

**Légende :**

$a$  = taille du sauteur au décollage  
 $b$  = hauteur du centre de masse au décollage  
 $l_0$  = longueur de levier ( $l_0 = l + \Delta l$ )  
 $l$  = longueur de la corde de la perche  
 $\Delta l$  = raccourcissement de la perche  
 $\beta$  = angle de la corde de la perche par rapport à l'horizontale  
 $C_m$  = centre de masse du sauteur  
 $V$  = vitesse initiale de translation  
 $V_x$  = vitesse horizontale initiale  
 $V_y$  = vitesse verticale initiale

$\alpha$  = angle de la vitesse de décollage

$M$  = moment exercé sur la perche (positif à l'impulsion, négatif lors du renversement)

$a_1, \dots, a_8$  = moments articulaires résultants

$d$  = distance entre le pied d'appel et le fond du butoir

$x$  = abscisse de la barre transversale

$h_b$  = hauteur de la barre transversale

$h_f$  = hauteur de franchissement

$h$  = hauteur maximale du centre de masse du sauteur

$r$  = distance entre la main supérieure et le centre de masse du sauteur

FIG. 2. – Représentation schématique des principaux paramètres pris en compte par les différents modèles physiques et méthodes de simulation.

## LES FACTEURS INDISCUTABLES

Cette liste reprend les principaux paramètres présentant une liaison soit positive, soit négative, avec la performance et identifiés par au moins deux auteurs différents.

### 1 – La taille du sauteur au décollage (3/14)<sup>3</sup>

En réalité, seulement deux auteurs ont trouvé que ce paramètre (a) était un facteur positif de la performance :

- J. Morawski *et col.* (1977) : la hauteur du centre de masse (b) et la distance (r) entre la main supérieure et le centre de masse du sauteur ( $C_m$ ) sont prises en compte dans le calcul de la performance maximale ;
- P.M. Mc Ginnis (1987) : dans son analyse statistique, cet auteur a trouvé une liaison positive entre la taille du sauteur au décollage (a) et la performance réalisée.

Ce résultat devrait faire définitivement taire les considérations égalitaristes qui ont un moment prévalu dans le milieu des entraîneurs français du saut à la perche et selon lesquelles tous les sauteurs, quelle que soit leur taille, avaient les mêmes chances de parvenir au plus haut niveau. De plus, cette conclusion semble être confirmée par la suprématie actuelle du perchiste ukrainien Sergueï Bubka, dans les compétitions internationales.

**2 – Rigidité de la perche (7/14)** : Plus la perche utilisée par le sauteur sera rigide, plus le saut sera élevé. Ce résultat dépend bien sûr de la capacité du sauteur à fléchir une telle perche, et donc de ses aptitudes physiques et techniques.

**3 – Vitesse horizontale initiale (7/14)** : Plus la vitesse horizontale ( $V_x$ ) atteinte par le sauteur à la fin de sa course d'élan est importante, plus celui-ci pourra franchir une barre élevée. La vitesse de course est donc l'une des qualités physiques à développer chez tout perchiste.

3. Le rapport entre parenthèses indique le nombre d'études qui ont identifié ce facteur de la performance, sur le nombre total de travaux analysés dans cet article.

**4 – Vitesse verticale initiale (3/14)** : Plus la vitesse verticale ( $V_y$ ) du sauteur au décollage est grande, plus celui-ci pourra sauter haut. La transformation du déplacement horizontal du sauteur (course d'élan) en déplacement vertical (ascension vers la barre) ne se fait pas uniquement grâce à la flexibilité de la perche en fibre de verre : le sauteur doit participer activement à ce processus en donnant une impulsion vers le haut.

**5 – Energie cinétique de translation initiale (3/14)** : Plus l'énergie cinétique de translation du sauteur au décollage est grande, plus celui-ci pourra franchir une barre élevée. Ce résultat est en relation directe avec les facteurs n°3 et n°4 puisque l'énergie cinétique de translation est calculée par la formule suivante :

$$E_{Ct} = \frac{1}{2} m V^2$$

où :

- $E_{Ct}$  = énergie cinétique de translation ;
- $m$  = masse du sauteur ;
- $V$  = vitesse de translation initiale ;

avec :  $V^2 = V_x^2 + V_y^2$

où :

- $V_x$  = vitesse horizontale initiale ;
- $V_y$  = vitesse verticale initiale.

**6 – Moment fléchissant positif au décollage (4/14)** : tous les auteurs ayant pris en compte ce paramètre dans leur analyse, théorique ou expérimentale, ont constaté que le sauteur devait obligatoirement appliquer un moment fléchissant positif sur la perche, aussitôt après le planter. Cette action conditionne la capacité du sauteur à fléchir une perche rigide (*cf. facteur n°2*) et met en évidence l'importance de l'action du bras inférieur du perchiste, à cet instant.

**7 – Amplitude du renversement (5/14)** : Plus le sauteur sera capable d'élever ses jambes et son bassin au-dessus du niveau des épaules, plus il pourra franchir une hauteur importante. Ce facteur est directement lié au travail musculaire développé par le perchiste au cours du saut, et notamment à la force des muscles extenseurs de l'épaule.

TABLEAU 1. – Tableau récapitulatif des facteurs de la performance identifiés par les différents modèles de mathématiques et méthodes de simulation.

<b>FACTEURS DE LA PERFORMANCE</b>	I	I	I	I	I	I	I	II						
	A	B	C	D	E	F	G	A	B	C	D	E	F	G
Taille du sauteur au décollage					+	+			+					
Longueur de levier						+			-		+			
Rigidité de la perche					+	+		+	+	+	+	+	+	+
Vitesse de translation initiale	-	-			+	+		+	+	+	+			
Vitesse horizontale initiale					+	+			+	+				
Vitesse verticale initiale					+				+	+				
Angle de la corde de la perche											-			
Angle de la vitesse de décollage														+
Distance pied d'appel / butoir							+							
Phase d'appui sur la perche								-						
Flexion de la perche					+						-			
$E_C$ de translation initiale	+	+				+								
Energie potentielle initiale					+									
Moment positif au décollage							+	+		+	+			
Moment négatif sur la perche							+	+		+	+			
Amplitude du renversement	+	+	+	+						+				
Moments articulaires résultants								+			+	+		
Restitution d'énergie par la perche		+		+						+				
$E_C$ de rotation totale					+									
$E_C$ de translation finale	-	-	-											
$E_C$ de rotation finale					-									
Energie potentielle finale		+	+	+	+				+					
Energie mécanique totale		+	+											
Hauteur de franchissement				-		-								
Abscisse barre transversale											+			

<b>Modèles Mathématiques</b>		<b>Méthodes de Simulation</b>	
I - A	FLETCHER et coll. (1960)	II - A	WALKER et KIRMSER (1973)
I - B	DILLMAN et NELSON (1968)	II - B	J. MORAWSKI et coll. (1977)
I - C	J.G. HAY (1971)	II - C	M. HUBBARD (1980)
I - D	J. MORAWSKI et coll. (1977)	II - D	A. DUREY (1993)
I - E	P.M. Mc GINNIS (1987)	II - E	J. DAPENA et T. BRAFF (1985)
I - F	G.M. GRINER (1984)	II - F	O. NICKLASS (1987)
I - G	P.M. Mc GINNIS (1986)	II - G	P.M. Mc GINNIS (1984)

**8 – Moments articulaires résultants**

(3/14) : L'influence de ces facteurs ( $a_1, \dots, a_8$ ) a été prise en compte par les auteurs suivants :

- M. Hubbard (1980) qui a intégré ces paramètres dans sa méthode de simulation, en se basant sur des valeurs mesurées chez un gymnaste ;
- A. Durey (1993) qui a repris le modèle du sauteur à trois segments défini par M. Hubbard et qui a ajusté les valeurs de ces moments par un processus d'essais et d'erreurs ;
- P.M. Mc Ginnis (1986) qui a mesuré expérimentalement les valeurs réelles de ces moments sur cinq sauteurs, en se basant sur un modèle du perchiste à neuf segments.

Ces différentes approches aboutissent à la même conclusion que le résultat précédent (*cf. facteur n° 7*), tout en l'affinant et en le quantifiant, à savoir que le sauteur doit être capable de développer un moment articulaire très important au niveau des épaules s'il veut réaliser une performance maximale.

**9 - Restitution d'énergie par la perche**  
 (3/14) : Plus la quantité d'énergie restituée par la perche est importante, plus le sauteur pourra franchir une barre élevée. Ce résultat dépend à la fois des caractéristiques d'élasticité de la perche, et de la capacité du sauteur à emmagasiner de l'énergie dans la flexion de la perche.

**10 - Energie cinétique de translation finale** (3/14) : L'énergie cinétique de translation du sauteur, au moment du franchissement de la barre, doit être aussi faible que possible. Cette conclusion s'applique à une performance maximale du sauteur et signifie que celui-ci a utilisé au mieux son énergie cinétique de translation initiale pour la transformer en énergie potentielle.

**11 - Energie potentielle finale** (5/14) : Par définition, l'énergie potentielle du centre de masse du sauteur au sommet de la trajectoire est liée à la hauteur atteinte à cet instant :

$$E_p = mgh$$

où :

- $m$  = masse du sauteur,
- $g$  = accélération de la gravité,
- $h$  = hauteur du centre de masse du sauteur.

Il est par conséquent évident que plus l'énergie potentielle finale sera importante, plus le saut sera élevé.

**12 - Energie mécanique totale** (2/14) :  
 Elle est définie par la relation :

$$E_T = E_{CT} + E_P$$

où :

- $E_T$  = énergie mécanique totale ;
- $E_{CT}$  = énergie cinétique totale ;
- $E_P$  = énergie potentielle.

C.J. Dillman et R.C. Nelson (1968) et J.G. Hay (1971) ont constaté que les meilleurs sauts se caractérisaient par la plus forte augmentation de l'énergie mécanique totale au cours de la dernière phase du saut, entre l'instant de flexion maximale de la perche et le lâcher de la perche par le sauteur. Cet accroissement était le résultat d'une bonne utilisation de l'énergie cinétique initiale et d'un gain important d'énergie verticale lors du redressement de la perche, notamment grâce à une activité musculaire intense de la part du sauteur au cours de cette phase.

**13 - Hauteur de franchissement** (2/14) : La hauteur de franchissement ( $h_f$ ) étant la différence entre la hauteur du centre de masse du sauteur au sommet de la trajectoire et la hauteur de la barre, il est évident que la performance sera d'autant plus élevée que la hauteur de franchissement sera faible, pour une hauteur maximale du centre de masse du sauteur.

## LES FACTEURS CONTROVERSÉS

Quelques-uns des facteurs identifiés dans l'analyse bibliographique présentaient, pour certains auteurs, une influence positive sur la performance, alors que d'autres études ont mis en évidence une relation

négative entre ces mêmes paramètres et la hauteur franchie. C'était le cas des facteurs suivants :

**1 – La longueur de levier :** De nombreuses études ont pris en compte ce paramètre ( $l_0$ ), mais seulement deux auteurs (A. Durey, 1993 ; P.M. Mc Ginnis, 1987) lui ont trouvé une liaison positive avec la performance, tandis qu'un seul (J. Morawski *et col.*, 1977) a constaté que si cette longueur était trop importante, tous les autres paramètres étant fixés, le sauteur serait rejeté en arrière. Ces trois auteurs ont raison, et leurs conclusions sont parfaitement défendables. Néanmoins, nous allons nous ranger du côté des deux premiers, pour les raisons suivantes :

- un des deux partisans de l'importance de la longueur de levier est P.M. Mc Ginnis (1987), qui est parvenu à cette conclusion à la suite d'une étude **expérimentale** et d'une analyse statistique particulièrement remarquables ;
- la conclusion de J. Morawski est basée sur les résultats d'une méthode de simulation permettant de faire varier les paramètres du saut indépendamment les uns des autres. Or, comme il le reconnaît lui-même, les valeurs optimales des paramètres du saut sont mutuellement liées par un système très complexe, et un accroissement de la vitesse initiale, associé à l'utilisation d'une perche plus rigide, et malgré une longueur de levier **supérieure**, peut se traduire par un saut **plus élevé**.

L'analyse de ce facteur met en lumière une des limites essentielles des méthodes de simulation en saut à la perche : elles permettent effectivement **d'optimiser** la valeur de l'un des paramètres pris en compte par les modèles de la perche ou du sauteur, sur lesquels elles sont basées, mais elles peuvent également produire des résultats **aberrants** en simulant des situations qui ne se rencontrent **jamaïs** dans la réalité. Ainsi, l'ordinateur peut réaliser les calculs qu'on lui demande de faire, car c'est une machine, alors que le sauteur refusera probablement de prendre des risques inutiles, **s'il sait**, par expérience, qu'il n'a pas les capacités physiques, techniques ou mentales pour les affronter.

**2 – La vitesse initiale de translation :** 5 auteurs sur 14 considèrent qu'une grande vitesse de translation du sauteur au décollage (V) est une condition indispensable pour franchir une barre élevée. Deux études, cependant, (C.J. Dillman et R.C. Nelson, 1968 ; J.G. Fletcher *et col.*, 1960) ont constaté que les meilleurs sauts n'étaient pas réalisés par les perchistes ayant la plus grande vitesse d'élan. Ces derniers semblaient même plutôt perturbés dans leurs mouvements à cause de cette vitesse importante.

Sachant que ces deux études sont, relativement, les plus anciennes analysées dans cet article, d'une part, et que la plupart des études ultérieures sur le sujet sont arrivées à des conclusions contraires (notamment celle de P.M. Mc Ginnis, 1987), d'autre part, deux hypothèses peuvent être émises :

- les études concernées n'ont pas été réalisées sur les meilleurs perchistes du moment<sup>4</sup>, et par conséquent ceux-ci n'étaient pas aptes à maîtriser les perturbations engendrées par une vitesse de course importante ;
- la technique du saut avec une perche en fibre de verre n'en était qu'à ses débuts et les praticiens, entraîneurs et athlètes, n'avaient pas encore identifié de manière empirique tous les détails techniques qui leur auraient permis de tirer le meilleur parti de cet engin.

Enfin, sachant que les composantes horizontale et verticale de la vitesse de translation ont, par ailleurs, été identifiées comme des facteurs pertinents de la performance en saut à la perche, nous ne pouvons que conclure à l'importance de la vitesse initiale de translation pour la réussite du saut.

**3 – Importance de la flexion de la perche :** Sur ce facteur également, les avis sont partagés :

- dans son étude expérimentale, J.G. Hay (1971) a constaté que les meilleurs sauts étaient obtenus lorsque la flexion de la

4. J.G. Fletcher *et col.* (1960) ont réalisé leurs observations sur des sauts à des hauteurs inférieures à 4,00 m, alors que le record du monde était de 4,80 m en 1960 ; C.J. Dillman et R.C. Nelson (1968) ont analysé des sauts à des hauteurs comprises entre 3,81 m et 4,57 m, alors que le record du monde était de 5,41 m en 1968.

- perche était la plus importante et la plus longue ;
- inversement, grâce à sa méthode de simulation, A. Durey (1993) a remarqué que lorsque la flexion de la perche à l'impulsion augmentait, le sauteur rencontrait certaines difficultés pour réussir son saut.

Encore une fois, ces deux auteurs ont raison, chacun s'appuyant sur ses propres résultats, mais leurs observations ne sont pas faites dans le même contexte :

- J.G. Hay a tiré ses conclusions d'une observation dans des conditions réelles de compétition, où il n'a pas pu mesurer effectivement la rigidité des perches utilisées par les sauteurs ;
- Alain Durey a considéré ce paramètre indépendamment des autres facteurs de la performance. Il est vraisemblable que, dans sa méthode de simulation, une flexion importante caractérisait une perche souple et, par conséquent, était un facteur défavorable de la performance.

En conclusion, le degré de flexion de la perche ne peut pas constituer à lui seul un facteur pertinent de la performance ; il doit être associé aux caractéristiques de rigidité pour définir un facteur plus global, tel que l'énergie de déformation de la perche, par exemple.

**4 – Application d'un moment fléchissant négatif sur la perche :** Quatre auteurs ont envisagé cette hypothèse dans leurs travaux, et tous ont constaté l'influence de cette action du sauteur sur la rigidité de la perche et sur la réussite du saut. Cependant, leurs avis divergent quant à l'instant auquel ce moment négatif doit être appliqué par le sauteur sur la perche :

- M. Hubbard (1980), dans sa méthode de simulation, a introduit ce moment seulement 0,1s après le décollage du sauteur ;
- G.M. Griner (1984), d'un point de vue théorique, a considéré que ce moment était appliqué **après** l'instant de flexion maximale de la perche ;
- Alain Durey (1993) a repris le modèle du sauteur de M. Hubbard, ainsi que ses hypothèses, pour les introduire dans sa méthode de simulation ;
- Peter M. Mc Ginnis (1986) a mesuré les

moments articulaires développés par le perchiste lors de sauts réels, et s'est aperçu que celui-ci appliquait un moment négatif sur la perche seulement 0,21s après l'appel, soit 0,28s **avant** la flexion maximale de la perche.

La conclusion de cette confrontation de points de vue est évidente et au bénéfice de l'étude expérimentale de P.M. Mc Ginnis. Cependant, comme aucune mesure directe de ce phénomène n'a été réalisée, jusqu'à présent, seule une étude expérimentale future, utilisant des jauge de contraintes directement collées sur le corps de la perche, permettrait d'identifier tant la chronologie que l'intensité des actions du sauteur sur la perche.

## LES AUTRES FACTEURS

Certains facteurs de la performance n'ayant été identifiés que par un seul auteur, il serait présomptueux d'en tirer des conclusions générales, malgré toute la rigueur des études qui les ont mis en évidence. Cependant, ils peuvent être analysés à la lumière des conclusions précédentes.

**1 - Angle de la corde de la perche au décollage** (A. Durey, 1993) : Grâce à sa méthode de simulation, cet auteur a trouvé que l'ouverture de l'angle de la corde de la perche au décollage ( $\beta$ ) était un facteur défavorable à la performance. Ce résultat conforte une autre conclusion du même auteur selon laquelle lorsque la longueur de levier diminue (et par conséquent l'angle de la corde de la perche au décollage augmente), le saut réalisé est inférieur, toutes choses étant égales par ailleurs. Mais il contredit les conclusions de J. Morawski *et col.* (1977) et de P.M. Mc Ginnis (1987) pour lesquels la performance réalisée est supérieure si le sauteur est plus grand ou si son centre de masse au décollage est plus élevé.

Ce cas de figure illustre une nouvelle fois les limites d'utilisation des méthodes de simulation, qui peuvent faire varier un paramètre indépendamment des autres, et sans

tenir compte de ce qui se passe effectivement dans la réalité. Les conclusions de Alain Durey sont vraies pour un sauteur donné, mais deviennent caduques si sa méthode est appliquée à un perchiste plus grand que le précédent, tous les autres paramètres étant fixés, et si les résultats des deux simulations sont comparés entre eux : le plus grand des deux sauteurs réalisera sans aucun doute la meilleure performance, alors que l'angle d'ouverture de la corde de la perche au décollage sera également supérieur.

**2 – Angle de la vitesse de décollage** (P.M. Mc Ginnis, 1984) : La liaison positive de ce facteur ( $\alpha$ ) avec la performance n'est pas surprenante. Elle signifie que la composante verticale de la vitesse du sauteur au décollage est importante pour la réussite du saut, et cette conclusion a déjà été validée par deux autres auteurs (M. Hubbard, 1980 ; J. Morawski *et col.*, 1977).

**3 – Distance du pied d'appel par rapport au fond du butoir** (P.M. Mc Ginnis, 1977) : Ce facteur ( $d$ ) a été mesuré dans une seule étude, mais la mise en évidence de son influence significative sur la performance corrobore parfaitement les résultats des observations empiriques effectuées par les entraîneurs français (M. Houvion, 1988) et étrangers (R. Attig, 1987).

**4 – Durée de la phase d'appui sur la perche à l'impulsion** (P.M. Mc Ginnis, 1987) : Ce laps de temps doit être aussi bref que possible, pour une performance optimale, ce qui signifie que le sauteur doit retarder au maximum le planter de sa perche lorsqu'il est encore en appui sur son pied d'appel. Par conséquent, il doit prendre son impulsion avant même de s'être assuré de la stabilité de la perche dans le butoir. Cette conclusion semble plutôt risquée pour le perchiste, mais sachant qu'elle découle d'une étude expérimentale très complète, les entraîneurs peuvent toujours essayer de la conseiller à leurs athlètes, afin de vérifier ses effets dans la réalité.

**5 – Energie potentielle initiale** (P.M. Mc Ginnis, 1987) : L'influence positive de ce facteur sur la performance est directement

liée à la taille du sauteur au décollage (a), paramètre qui a déjà été discuté précédemment. Bien que ce résultat n'ait été trouvé que par un seul auteur, il est raisonnable de le considérer comme un facteur pertinent de la performance en saut à la perche.

**6 – Energie cinétique de rotation totale** (J.G. Hay, 1971) : Les meilleures performances sont réalisées par les sauteurs capables de développer la plus grande énergie cinétique de rotation totale. Sachant que l'auteur a divisé ce paramètre par la masse du perchiste afin d'effectuer des comparaisons entre différents sujets, il apparaît que les meilleurs sauteurs sont ceux qui présentent les plus grandes vitesses de rotation segmentaires. Ce résultat est cohérent par rapport à l'influence significative des moments articulaires sur la performance (A. Durey, 1993 ; P.M. Mc Ginnis, 1986 ; M. Hubbard, 1980).

**7 – Energie cinétique de rotation finale** (J.G. Hay, 1971) : L'auteur a analysé l'influence de ce facteur à deux instants consécutifs du saut :

- *A la fin du renversement* : à cet instant, les meilleurs sauteurs développent une grande énergie cinétique de rotation. Ce résultat corrobore les conclusions précédentes sur l'importance du travail musculaire du perchiste pour éléver son bassin au-dessus du niveau des épaules ;
- *Lors du franchissement de la barre* : à cet instant, les meilleurs sauteurs possèdent la plus faible énergie cinétique de rotation. Ce résultat est cohérent par rapport à la nécessité pour le perchiste de posséder également la plus faible énergie cinétique de translation, pour réaliser une performance maximale (C.J. Dillman et R.C. Nelson, 1968 ; J.G. Fletcher *et col.*, 1960 ; J.G. Hay, 1971).

**8 – Abscisse de la barre transversale** (M. Hubbard, 1980) : L'auteur a intégré ce paramètre ( $x$ ) dans le processus d'optimisation de sa méthode de simulation. En effet, s'il est vrai que l'objectif premier du sauteur est d'élèver son centre de masse aussi haut que possible, il doit également atteindre le sommet de sa trajectoire à l'aplomb de la barre transversale. Pour ce faire, il peut modifier

les différents paramètres déjà énoncés, mais, en plus, il a la possibilité de déplacer le plan des poteaux de plus 80 cm ou moins 40 cm par rapport au bord postérieur du butoir, avant le saut. Toute erreur dans le choix de ce paramètre peut sanctionner sa tentative par un échec, et la position de la barre transversale apparaît donc effectivement comme un facteur important de la performance.

## CONCLUSION

Les facteurs de la performance présentés dans cette liste ne vont sans doute pas bouleverser la pratique et la pédagogie du saut à la perche puisque nombre de spécialistes de la discipline avaient intuitivement ou empiriquement connaissance de leur importance. Néanmoins, à la différence des écrits antérieurs des techniciens ou des praticiens sur le sujet, cette énumération ne reprend que les paramètres dont le lien avec la performance a été mis en évidence de manière **scientifique et objective**, par au moins deux auteurs différents, au cours des trente dernières années.

Dans le domaine scientifique, comme dans la plupart des domaines, toute vérité ou théorie reste vraie ou applicable tant qu'elle n'a pas été contredite ou réfutée. L'identification des facteurs de la performance en saut à la perche, réalisée ici et basée sur une analyse bibliographique, certes large mais non exhaustive, permet d'aboutir à des conclusions fiables et généralisables dans la plupart des cas. Cependant, force est de constater que lorsque deux résultats se contredisent, une méthode de simulation est souvent impliquée, en opposition avec une étude expérimentale.

L'objet de cet article n'est pas de remettre en cause l'intérêt fondamental des méthodes de simulation pour l'optimisation de la performance en saut à la perche, mais d'attirer l'attention sur le fait que la hauteur franchie par le sauteur est en réalité l'expression d'un compromis entre différents paramètres, dont certains sont interdépendants. En conséquence, l'optimisation de la performance par une méthode de

simulation ne peut être réalisée qu'en tenant en compte les valeurs limites des paramètres considérés, mais également leur degré de dépendance.

## BIBLIOGRAPHIE

- Attig R., « Understanding pole vault mechanics », *Track and Field Quarterly Review*, 87, 25-32.
- Dapena J., Braff T., « A two-dimensional simulation method for the prediction of movements in pole vaulting », *Biomechanics*, IX B, 1985, 458-463.
- Dapena J., Braff T., « Use of separate hand locations to calculate ground reaction force exerted on a vaulting pole », *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 15, n°4, 1983, 313-318.
- Defrance J., « L'adoption de la perche en fibre de verre », p. 257-263 in : *Culture Technique n°13 : Sport sans conscience n'est que ruine du corps* / sous la direction de Jocelyn Noblet, Paris, PUF, 1985, 327 p.
- Dillman C.J. and Nelson R.C., « The mechanical energy transformations of pole vaulting with a fiberglass pole », *J. of Biomechanics*, n°1, 1968, 175-183.
- Durey A., « Etude cinématique du saut à la perche : premiers éléments d'une modélisation », IIIèmes Journées internationales d'automne de l'ACAPS, Rennes, 35, 1987.
- Durey A., « Modélisation du saut à la perche : perspectives d'utilisation pour l'entraînement assisté par ordinateur », IVèmes Journées internationales d'automne de l'ACAPS, Poitiers, 174, 1989.
- Durey A., « Méthodologie de modélisation du saut à la perche : influence des paramètres et optimisation de la performance », in : Stockes I.A.F., Allard P. et Blanchi J.-P. : *Three Dimensional Analysis of Human Movement*, Human Kinetics Books (A paraître), 1993.
- Fletcher J.G., Lewis H.E., Wilkie D.R., « Human power output : the mechanics of pole vaulting », *Ergonomics*, 3, 1960, 30-34.
- Griner G.M., « A parametric solution to the elastic pole vaulting pole problem », *Journal of Applied Mechanics*, 51, 1984, 409-414.
- Hay J.G., « Mechanical energy relationships in vaulting with a fiberglass pole », *Ergonomics*, 14, n°4, 1971, 437-448.
- Houvion M., « Technique du saut à la perche », p. 29-45 in : *Saut à la perche*, Paris : Institut

- National des Sports / Fédération Française d'Athlétisme, 1968.
- Houvion M., « Le saut à la perche », p. 343-417 in : *Traité d'athlétisme*, 2<sup>e</sup>: Les sauts / sous la direction de Maurice Houvion, 1<sup>re</sup> éd., Paris : Editions Vigot, (Sport + Enseignement), 1976.
- Houvion M., « Pole Vault », p. 134-164 in : H. PAYNE (Ed.) : *Athletes in Action*, London : Pelham, 317 p., 1985.
- Houvion M., « Le saut à la perche », p. 360-389 in : *Traité d'athlétisme*, 3 : Les sauts / sous la direction de Maurice Houvion, 2<sup>e</sup> éd., Paris : Editions Vigot, 479 p., (Sport + Enseignement), 1988.
- Hubbard M., « An iterative numerical solution for the elastica with causally mixed inputs », *ASME Journal of Applied Mechanics*, 47, 1980, 200-202.
- Hubbard M., « Dynamics of the Pole-Vault », *Journal of Biomechanics*, 13, 1980, 965-976.
- Hubbard M., Barlow D.A., « A Multiple Segment Pole-Vault Model With Optimization of Vaulter Inputs and its Use in Coaching », p. 33-48 in : J.M. Cooper and B. Haven (Ed.) : *Proceedings of the Biomechanics Symposium*, Bloomington (Indiana) : Indiana State Board of Health, 1980.
- Hubbard M., Barlow D.A., « Prediction and verification of trajectories and forces in the pole vault », *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Annual Conference of the American Society of Biomechanics*, Burlington (Vermont), 1980.
- International Amateur Athletic Federation (1990). *Manuel Officiel 1990/91*. – Horsham : Marshallarts Print Service Ltd. (England), 208 p.
- International Amateur Athletic Federation, *Progression of World Best Performances and Official IAAF World Records* / Research, compilation and text : Ekkehard zur Megede and Richard Hymans, London : I.A.A.F., 1990, 705 p.
- Jenks H.R., « Problems encountered when introducing aerospace materials into sporting goods products », *Proceedings of the 29<sup>th</sup> Annual Technical Conference*, Reinforced Plastics and Composites Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc., 1974.
- Larcher C., Saut à la perche : les facteurs de la performance : Présentation de la thèse de 3<sup>ème</sup> cycle de J.-C. Perrin. *Revue E.P.S.*, n°153, 1978, 71-73.
- Mc Ginnis P. M., « The inverse dynamics problem in pole vaulting », *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 15, 1983, 112.
- Mc Ginnis P.M., *Dynamic finite element analysis of a human implement in sport: the pole vault*. Thesis : Ph. D., unpublished doctoral dissertation, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1984, 136 p.
- Mc Ginnis P.M. and Bergman L.A., « An inverse dynamic analysis of the pole vault », *International Journal of Sport Biomechanics*, 2, 1986, 186-201.
- Mc Ginnis P.M., *Performance limiting factors in the pole vault*. Unpublished report to the U.S. Olympic Committee Sports Medicine Council, 1987, 36 p.
- Mc Ginnis P.M., « Performance limiting factors in the pole vault », *Medicine and Science in Sports and Exercise*, 19, 1987, 518.
- Mc Ginnis P.M., *Approach run variability in the pole vault*. Unpublished report to the U.S. Olympic Committee Sports Medicine Council, 1990, 31 p.
- Morawski J., Buczek M., Wiklik K., Sliwinski M., *Badania Modelowe Skoku o Tyczce* [Modèle théorique du saut à la perche]. Warszawie : Miedzyuczelniany Instytut Naukowy Sportu, Akademii Wychowania Fizycznego, 1977, 126 p.
- Nicklass O., *A three dimensional simulation method for the prediction of movements in pole vaulting*. Thesis : Ph.D., School of Health, Physical Education and Recreation, unpublished doctoral dissertation, Indiana University, 1987, 234 p.
- Perrin J.-C., *Les facteurs de la performance : Utilisation de l'informatique dans le cadre d'un programme de recherche sportive : Exemple pris sur les sauteurs à la perche*. Thèse 3<sup>e</sup> cycle : Sciences de l'Education : Education Physique : Université de Paris VII. 1977.
- Walker H.S. and Kirmser P.G., « Computer modeling of pole vaulting », p. 131-141 in : J.L. Bleustein (Ed.) : *Mechanics and Sport*. – New York : AMD, 4, American Society of Mechanical Engineers, 1973.
- Walker H.S. and Kirmser P.G., « Biomechanical parametric analysis of pole vaulting and optimization of performance », p. 444-461 in : T.K. Cureton : *Human performance : Efficiency and improvements in sports, exercises and fitness*, American Alliance for Health, Physical Education, Recreation and Dance, 1985.