

# Réflexion Sport

Scientifique & technique

# EXTRAIT

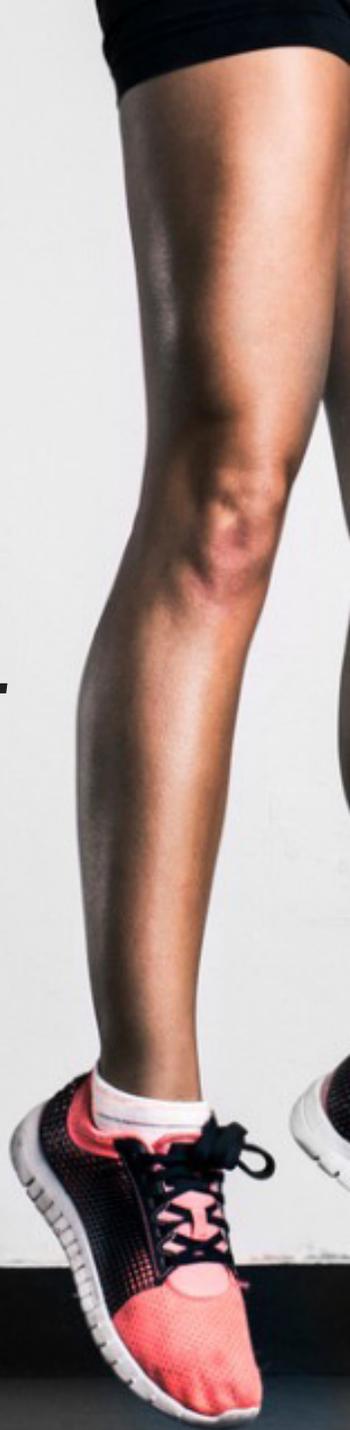
## Détente verticale :

*approche  
individualisée  
de l'entraînement  
basée sur le profil  
force-vitesse*



# Détente verticale

*Approche  
individualisée  
de l'entraînement  
basée sur le profil  
force-vitesse*





Par Jean-Benoît Morin

Professeur des universités,  
laboratoire interuniversitaire de biologie de la motricité,  
Institut régional de médecine et ingénierie du sport,  
université Jean-Monnet, Saint-Étienne.



Pierre Samozino

Maître de conférences,  
laboratoire interuniversitaire de biologie de la motricité,  
université Savoie-Mont-Blanc.

**A**ction essentielle dans de nombreux sports, le saut requiert des qualités physiques très particulières, mélange de force, de vitesse et de puissance. Toutefois, développer ces qualités ne s'improvise pas et nécessite une réflexion adaptée à la biomécanique de chaque athlète. Car si tout le monde peut sauter, chacun le fait avec sa propre technique, et ses propres qualités physiques.

Dans l'inconscient collectif, sauter haut, à l'instar de courir vite ou soulever de lourdes charges, fait partie des capacités physiques de base caractérisant le potentiel athlétique des sportifs. Certes, la « détente verticale » n'est qu'une des qualités physiques des athlètes, qui ne sont elles-mêmes qu'une des composantes de la performance sportive, notamment en sports collectifs. Cependant, de nombreuses actions décisives sont permises par une performance de saut vertical importante, en basket-ball ou volley-ball, mais également dans des sports *a priori* moins concernés comme le rugby ou le football. Nul n'a oublié la détente de Cristiano Ronaldo pour exécuter son retourné parfait face à la Juventus Turin en avril 2018 ou sa tête estimée à 2,56 m de hauteur en décembre 2019. Tout comme la performance individuelle en sprint, la capacité de détente verticale n'est donc pas un élément central de la performance, mais une qualité physique nécessaire et parfois limitante. Demandez à n'importe quel athlète si une amélioration de leur performance en saut vertical

leur semble utile, peu répondront négativement. Bien entendu, le « champion du monde de détente verticale » ne sera pas forcément un bon footballeur ou basketteur, mais si l'ensemble d'une équipe de volley-ball, basket-ball, football, rugby, ou même une troupe de danse classique gagne 5 ou 10 % de détente (Escobar Álvarez *et al.* 2019), cela contribuera *in fine* à des gains de performance globale...

“ ... être fort à basse vitesse » ne veut pas forcément dire « être fort à haute vitesse... ”

## Se méfier des idées reçues

Comment produit-on un saut ? La performance en saut demande l'expression de hauts niveaux de force à de grandes vitesses, développée sur une durée très courte, limitée par la distance de déploiement du membre inférieur ou « distance de poussée » (Hpo). La qualité ▶



Cristiano Ronaldo (Juventus Turin, 2018). ©IconSport

physique traduisant cette combinaison de force et de vitesse est la puissance mécanique, exprimée en watts (W), que l'on peut considérer comme représentant le produit sur un temps donné de la force et de la vitesse exprimées. Dès lors, on pourrait imaginer que pour tout programme ou exercice visant à développer la production de force ( $F_0$ ) et/ou de vitesse ( $V_0$ ) chez des jeunes athlètes, les marges de progression minimales des athlètes entraînés nécessitent une approche plus fine, individualisée, et basée sur l'exploration des qualités de force et vitesse sous-tendant la production de puissance. La capacité d'un sportif à produire de la force à différentes vitesses est très bien décrite par la relation décroissante force-vitesse. Cette relation part de la force maximale qu'il est capable de produire à vitesse nulle ( $F_0$ ) et diminue jusqu'à la vitesse maximale jusqu'à laquelle il peut

produire de la force ( $V_0$ ). Contrairement à une idée reçue dans le monde de l'entraînement qui veut que pour décoller vite, il faut créer de l'accélération et donc produire de grandes quantités de force, une étude récente menée chez plus de 500 athlètes dans 14 sports différents identifie la très faible corrélation entre la force maximale (représentée par la valeur extrême du profil côté force :  $F_0$ ) et la qualité de production de force à vitesse maximale (valeur extrême du profil côté vitesse :  $V_0$ ), cette corrélation est d'autant plus faible que le niveau de pratique est élevé (Fig. 1) [Jiménez-Reyes *et al.* 2018].

Ainsi, « être fort à basse vitesse » ne veut pas forcément dire « être fort à haute vitesse », et dans de nombreuses disciplines sportives la question cruciale est bien : « À quelle vitesse pouvez-vous être fort ? »

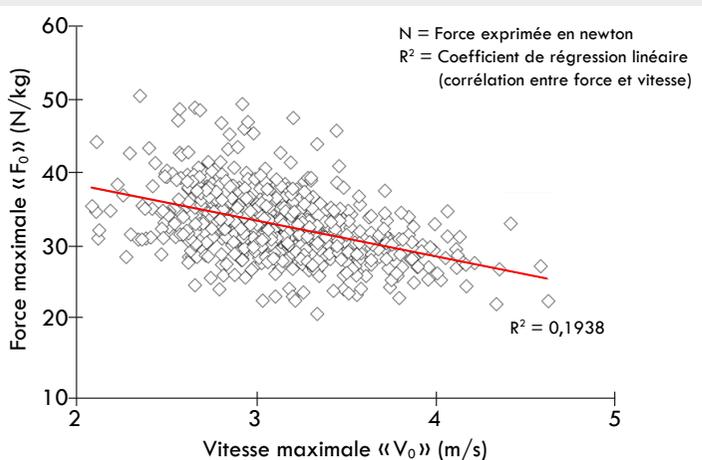


Figure 1 – Faible corrélation entre les qualités de force maximale ( $F_0$ ) et de force à vitesse maximale ( $V_0$ ) pour une population de 553 athlètes pratiquant 14 sports différents à des niveaux allant d'amateur à international (Jiménez-Reyes *et al.* 2018).

## Contexte

Dans cet article, nous ne nous intéresserons pas à la puissance musculaire exprimée au niveau de la fibre, du muscle « isolé » ou d'un exercice non spécifique de type mono-articulaire (flexion du coude, extension du genou). Bien que ces approches « microscopiques » permettent la compréhension des mécanismes neurophysiologiques de la production de puissance ou le ciblage de certains groupes musculaires, nous placerons notre analyse à une échelle macroscopique, plus proche de la spécificité de la motricité « corps entier » (Alcazar *et al.* 2019). Ainsi, nous analyserons la résultante externe de la production de force et de puissance par les muscles lors du mouvement d'extension balistique (c'est-à-dire avec intention et vitesse maximale) du membre inférieur en saut. Ce choix est dicté par un compromis entre ce qu'il est possible de mesurer précisément (malgré de récentes avancées expérimentales [Martin *et al.* 2018], la mesure de force et de puissance produites par le muscle en cours d'exercice sportif est à ce jour impossible) et ce qui va directement impacter la performance motrice en respectant la spécificité gestuelle propre à chaque action sportive. Une limite de cette approche macroscopique est qu'elle englobe tous les mécanismes sous-jacents à la production de force et de vitesse (types d'unités motrices, coordinations, synergies, architecture musculaire, interactions muscle-tendon, taux de montée en force...) dans un nombre limité de variables représentant ce que nos membres inférieurs sont capables de produire d'un point de vue mécanique.

## Définitions et mesures classiques en laboratoire

Depuis les études en chronophotographie d'Étienne-Jules Marey dans les années 1890-1920 (Marey, 2002), un modèle d'analyse biomécanique du mouvement « corps entier » consiste à étudier le déplacement du corps (réduit à son centre de masse) dans le temps. Ainsi, lorsqu'un athlète accélère sa masse contre la gravité lors d'un saut, un travail mécanique est produit. La puissance mécanique est cette quantité de travail produite ramenée à l'unité de temps qui a été nécessaire pour la produire. Sur un geste donné comme la poussée préalable au décollage en saut, un athlète puissant va produire beaucoup de travail mécanique en une durée très courte. Cela implique qu'en pratique, il est nécessaire de mesurer le travail mécanique appliqué au centre de masse (force externe générée) et la vitesse de déplacement du corps (assimilé à son centre de masse). Aujourd'hui, les approches principales pour évaluer force, vitesse, et donc puissance en saut, sont (Giroux *et al.* 2015) :

- la mesure de position par encodeurs linéaires ;
- l'analyse vidéo pour les segments corporels ou le centre de masse ;
- le « *gold standard* » plateforme de force.

S'ils présentent des niveaux de précision et de reproductibilité globalement élevés, ces outils présentent deux inconvénients majeurs pour l'étude de la ►

performance sportive et son suivi : ce sont des équipements de laboratoire coûteux et ne permettant pas de mesures sur le terrain.

“... un athlète puissant va produire beaucoup de travail mécanique en une durée très courte.”

## À portée de smartphone

Nos récents travaux ont permis de valider des méthodes et des concepts pour une évaluation et un développement individualisé des qualités de force, vitesse et puissance (Morin et Samozino, 2016, 2018). En nous basant sur le calcul du travail mécanique nécessaire pour élever la masse corporelle lors d'une extension en saut vertical sans élan (*squat jump*), nous avons abouti en 2008 à l'élaboration des équations simples permettant d'évaluer force ( $F$  en N), vitesse ( $v$  en m/s) et puissance ( $P$  en W) produites lors de ce geste d'extension du membre inférieur :

$$F = mg \left( \frac{H}{H_{po}} + 1 \right) \quad v = \sqrt{\frac{gH}{2}} \quad P = F \cdot v$$

Avec  $m$  la masse de l'athlète (en kg),  $g$  la constante d'accélération due à la gravité ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $H$  la hauteur de saut (en mètres) et  $H_{po}$  la distance de poussée (différence de longueur du membre inférieur entre position d'extension maximale et position de départ préférée de l'athlète avec genoux à environ  $90^\circ$ ).

Des équations validées en comparaison à des données de référence de plateforme de force (Samozino *et al.* 2008), et depuis confirmées par d'autres études (p. ex. Giroux *et al.* 2015 ; Palmieri *et al.* 2015 ; Jiménez-Reyes *et al.* 2017a, Garcia-Ramos *et al.* 2019). Ces équations sont également valides lors de sauts avec charge additionnelle sur les épaules, ce qui rend possible la détermination du profil force-vitesse en saut (Samozino *et al.* 2014) et le calcul des variables de force ( $F_0$ ), vitesse ( $V_0$ ) et puissance ( $P_{\max} = F_0 \cdot V_0 / 4$ ) maximales théoriques de chaque athlète, ainsi que l'orientation de son profil force-vitesse ( $S_{fv}$  = pente de la droite force-vitesse). On notera que la précision du calcul de  $P_{\max}$  a été également validée en comparaison aux données de plateforme de force (Samozino *et al.* 2014 ; Morin et Samozino, 2018).

Hormis la masse (corps + charges additionnelles éventuelles) et la longueur du membre inférieur, la seule variable d'entrée requise est la hauteur de saut, qui doit être mesurée précisément, ce qui est possible avec de nombreux appareils (p. ex., plateformes de force), les systèmes opto-électroniques (de type Optojump) ou une application comme « MyJump 2 ». Sur ►

“... il est possible d'établir le profil force-vitesse-puissance en onditions de terrain avec une grande justesse.”

la base de cette dernière, validée par plus de dix études depuis 2015 (Balsalobre-Fernández *et al.* 2015), et de l'utilisation d'une feuille de calcul gratuite (*Force-Velocity Profile*), il est possible d'établir le profil force-vitesse-puissance en conditions de terrain avec une grande justesse. On notera que toute caméra présentant un ralenti de 120 images par seconde ou plus et permettant une analyse temporelle des gestes sportifs pourra être utilisée également. La hauteur atteinte par

le centre de masse peut alors être déterminée en suivant les lois de la chute des corps comme  $H = g/8 \cdot t_v^2$  avec  $t_v$  le temps passé par l'athlète « en l'air » entre décollage et atterrissage (le mouvement doit être symétrique avec des positions de départ et d'arrivée identiques).

L'ensemble des calculs, approches et validations présentées ici pour la modalité de saut sans élan (*squat jump - SJ*) ont été validés pour la modalité avec ▶

Date		Nom		Masse corporelle (kg)	85
Heure		Prénom		Longueur membres inf. (m)	1,12
				Hauteur artic. (m)	0,7
				Dist. de poussée Hpo (m)	0,44

Condition (% BW)	Masse additionnelle (kg)	Masse totale (kg)	Essai S-1 (m)	Essai S-2 (m)	Essai S-3 (m)	Hmax (m)	F (N)	V (m·s <sup>-1</sup> )	P (W)
0	0	85,0	0,344	0,347	0,347	1491,5	-1,30	1946	0,96
20	105,0	190,0	0,239	0,237	0,239	1589,5	1,08	1721	-0,98
40	125,0	210,0	0,19	0,187	0,19	1755,8	0,97	1695	2389
60	145,0	230,0	0,12	0,12	0,12	1816,9	0,77	1405	28,1
Charges utilisées	80	165,0	0,088	0,088	0,088	1946,1	0,66	1286	-696

$y = -698,41x + 2388,6$   
 $R^2 = 0,9611$

Fo (N/kg)	28,1
Vo (m/s)	3,42
Pmax (W/kg)	24,0
Sfv (N.s/m/kg)	-8,22

Profil F-V à 30° =	81 %
optimisés	
La FORCE est à développer	
Profil F-V à 90° =	61 %
optimisés	
La FORCE est à développer	

**Charges utilisées**

r <sup>2</sup>	0,96
r	-0,98
Fo (N)	2389
Fo (N/kg)	28,1
Sfv (N.s/m)	-696
Sfv (N.s/m/kg)	-8,22
Vo (m/s)	3,42
Pmax (W)	2042
Pmax (W/kg)	24,0
Sfv opt (N.s/m/kg)	-13,4

**Profil force-vitesse complet, réel et optimal**

- 1 Mesurer la longueur des membres inférieurs (par exemple de la crête iliaque à la pointe des arêtes)
- 2 Mesurer la hauteur initiale avec une position confortable
- 3 Vérifier que la hauteur de départ est utilisée à chaque essai de saut (utiliser les marquages)
- 4

[jean-benoit.morin@unice.fr](mailto:jean-benoit.morin@unice.fr)  
[pierre.samozino@univ-savoie.fr](mailto:pierre.samozino@univ-savoie.fr)

élan (*countermovement jump – CMJ*) par les travaux de Pedro Jiménez-Reyes *et al.* en 2014 et 2017a. Enfin, des travaux récents ont montré que la qualité d'information était maintenue en établissant le profil linéaire force-vitesse non pas avec plusieurs charges, mais seulement deux (Fig. 2) : charge nulle (*squat jump*) et charge avec laquelle l'athlète est capable de produire une hauteur de saut d'environ 10 cm (environ 75 à 100 % de la masse corporelle [García-Ramos *et al.* 2018]). Lorsque plus de deux conditions de charges sont utilisées, le coefficient d'ajustement de la relation doit être supérieur à  $R^2 = 0,95$  (comme dans la figure 2) pour une bonne fiabilité des interprétations.

Bases scientifiques :	Téléchargements :
Samozino <i>et al.</i> 2008	<a href="#">A simple method for measuring force velocity and power output during squat jump</a>
Samozino <i>et al.</i> 2010	<a href="#">Jumping ability: A theoretical integrative approach</a>
Samozino <i>et al.</i> 2012	<a href="#">Optimal Force-Velocity Profile in Ballistic Movements-Altius</a>
Samozino <i>et al.</i> 2014	<a href="#">Force-Velocity Profile: Imbalance Determination and Effect on Lower Limb Ballistic Performance</a>
Samozino <i>et al.</i> 2016	<a href="#">Interpreting Power-Force-Velocity Profiles for Individualized and Specific Training</a>

Figure 2 – Feuille de calcul *Force-Velocity Profile*. Exemple de profil force-vitesse en *squat jump*. Pour cet athlète :  $F_0 = 28,1$  N/kg,  $V_0 = 3,42$  m/s,  $P_{\max} = 24$  W/kg ; il présente un déficit force-vitesse ( $FV_{imb}$ ) d'environ 40 % pour optimiser sa performance en saut vertical (voir plus loin).

## Un profil force-vitesse propre à chacun

Sur la base de l'équation  $P_{\max} = F_0 \cdot V_0 / 4$  (vue précédemment) permettant d'estimer le sommet de la relation puissance-vitesse, on remarque qu'une même puissance maximale ( $P_{\max}$ ) peut être obtenue par une infinité de combinaisons entre les capacités maximales de force et de vitesse du système neuromusculaire, traduites par les variables  $F_0$  et  $V_0$  (Samozino *et al.* 2014). Il a été montré, d'abord de façon théorique (Samozino *et al.* 2010) puis par des données expérimentales (Samozino *et al.* 2012 ; Jiménez-Reyes *et al.* 2017a), qu'il existait, pour chaque individu caractérisé par ses valeurs de  $P_{\max}$  et  $H_{po}$ , un profil force-vitesse qui maximise la performance en saut et représente le bon équilibre à avoir entre force et vitesse. On parle de « profil force-vitesse individuel optimal » (Fig. 3) qui, au-delà d'améliorer  $P_{\max}$ , se veut la cible à atteindre par l'entraînement pour améliorer la performance en saut.

Dès lors, il est possible de calculer le profil force-vitesse optimal d'un athlète ( $S_{FVopt}$ ) et de le comparer à son profil réellement mesuré. L'écart entre ces deux profils est appelé « déficit force-vitesse » ( $FV_{imb}$ ) (Fig. 4). Une étude récente a ainsi révélé chez des joueurs de rugby, de football et des sprinters de haut niveau que les meilleures performances en *squat jump* étaient accomplies par les athlètes présentant la plus grande  $P_{\max}$ , mais aussi le plus faible déficit  $FV_{imb}$ , c'est-à-dire le ►

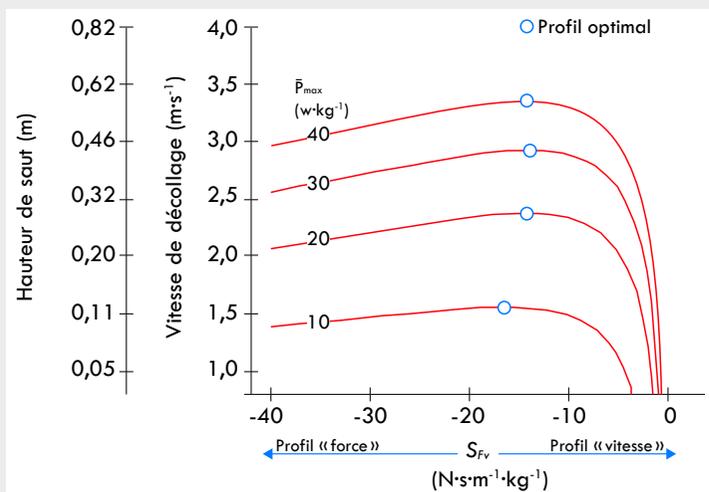
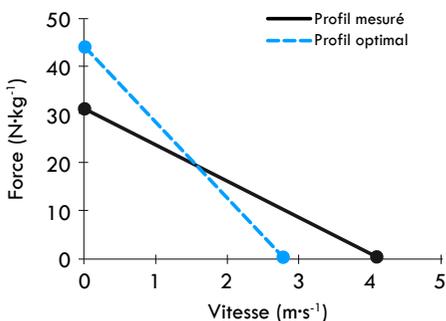


Figure 3 – Effet de la puissance maximale et du profil force-vitesse des membres inférieurs sur la performance en saut vertical. Il existe, pour chaque individu (caractérisé par ses valeurs de  $P_{max}$  et  $H_{po}$ ), un profil force-vitesse optimal qui maximise la performance en saut (points blancs sur les courbes). D'après Samozino *et al.* 2010, 2012.

## Athlète A

Hauteur en squat jump	27,0 cm
Masse corporelle	90 kg
Distance de poussée	0,25 m
Puissance maximale	24,5 W·kg
Déficit force-vitesse $FV_{imb}$	40 %



## Athlète B

Hauteur en squat jump	27,0 cm
Masse corporelle	80 kg
Distance de poussée	0,35 m
Puissance maximale	20,0 W·kg <sup>-1</sup>
Déficit force-vitesse $FV_{imb}$	1 %

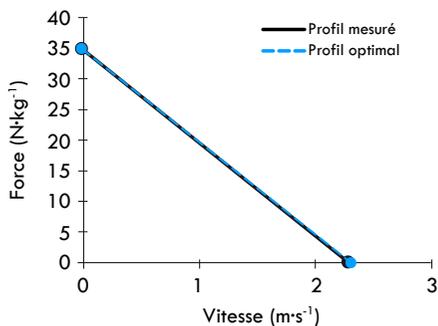


Figure 4 – Deux athlètes présentant la même hauteur de saut en *squat jump* (27 cm) peuvent présenter des valeurs de  $P_{max}$  très différentes, et *vice versa*. Dans cet exemple, l'athlète A présente une  $P_{max}$  20 % plus élevée, mais un grand déficit force-vitesse, une masse corporelle plus élevée, et une distance de poussée plus faible. Ces facteurs expliquent en grande partie leur performance égale malgré un écart de  $P_{max}$  marqué.

profil force-vitesse le plus proche de leur profil optimal (Samozino *et al.* 2014). Une hypothèse éprouvée en CMJ chez des athlètes (sprinters, sauteurs) de haut niveau, donc dans un contexte plus en lien avec la performance de saut spécifique à certains sports comme le volley-ball ou le basket-ball (Jiménez-Reyes *et al.* 2017a).

## La hauteur de saut peut être trompeuse

Afin de mieux comprendre l'importance pratique de déterminer et suivre l'évolution des profils force-vitesse-puissance du membre inférieur, il faut noter que les marqueurs indirects « classiques » de  $P_{\max}$ , basés sur des tests de performance, peuvent aboutir à des erreurs d'interprétation sur les causes de cette performance, en termes de capacités neuromusculaires. La hauteur de saut, très classiquement utilisée dans les batteries d'évaluation comme un indicateur de  $P_{\max}$ , peut être biaisée par plusieurs variables. Dans un article publié en 2019 (Morin *et al.* 2019), nous avons montré de façon théorique (mais de nombreux exemples ont été observés dans notre suivi de joueurs et d'athlètes depuis quelques années) que deux individus sautant à la même hauteur de saut peuvent présenter des valeurs de  $P_{\max}$  différentes, dans une marge parfois supérieure à 20 %. Les principaux facteurs pouvant influencer  $P_{\max}$  (pour une même hauteur enregistrée en saut) sont les suivants :

**La masse corporelle** et le ratio masse grasse/masse maigre. Pour une capacité musculaire des membres inférieurs identique, le travail mécanique (et donc la puissance) nécessaire pour porter la masse corporelle à une hauteur donnée ne sera pas le même, et deux joueurs de masses (corporelle et/ou grasse) différentes auront des niveaux de  $P_{\max}$  différents, masqués par une détente verticale *a priori* identique.

**La distance d'extension du membre inférieur** lors de la phase de poussée. Cette variable anthropométrique (nommée  $H_{po}$  dans la figure 2) dépend des longueurs segmentaires, mais également de la mobilité articulaire, et influence grandement le temps de production de puissance par les extenseurs du membre inférieur, et donc la puissance, à travail mécanique égal (hauteur de saut et masse corporelle égales). Par exemple, nous avons calculé que deux athlètes présentant une même hauteur au *squat jump* peuvent voir leur  $P_{\max}$  varier de 20 % pour une différence de  $H_{po}$  de 10 cm (25 cm contre 35 cm), cas assez fréquent lors d'évaluations sur des équipes de football, rugby, basket-ball ou volley-ball. Cette source d'erreur aboutit à une sous-estimation marquée de la  $P_{\max}$  des athlètes de plus petite taille, qui pour une même hauteur au *squat jump* sont en fait bien plus puissants que leurs coéquipiers plus grands à masse corporelle égale. Ce fait remet en cause l'utilisation de la hauteur de saut comme un index de puissance musculaire dans le cadre de détection-suivi des athlètes en phase de croissance notamment. ▶

“... Certains athlètes, très orientés en force notamment, ont besoin d’une charge plus élevée que leur masse corporelle.”

Le « profil force-vitesse optimal » et la « charge optimale », enfin, influencent fortement la performance au *squat jump*. En effet, la puissance maximale des membres inférieurs dépend de la vitesse à laquelle ces derniers s’étendent, celle-ci étant liée à la charge à mobiliser. Un *squat jump* peut être considéré comme un saut avec une charge « additionnelle » égale à la masse corporelle. Or chez certains athlètes, ces conditions de résistance ne sont pas celles permettant d’étendre ses membres inférieurs à la vitesse associée à  $P_{\max}$ . Certains athlètes, très orientés en force notamment, ont besoin d’une charge plus élevée que leur masse corporelle (typiquement 10 à 20 kg) pour être dans les conditions de production de  $P_{\max}$ . À l’opposé, les athlètes présentant des profils force-vitesse orientés en vitesse développent leur  $P_{\max}$  pour des charges inférieures à leur masse corporelle, autrement dit lorsqu’ils sont assistés dans leur mouvement (p. ex., avec des élastiques les tirant vers le haut ou lors de *squats* horizontaux). Ces deux types d’athlètes sont donc défavorisés lorsqu’on infère leur capacité de  $P_{\max}$  sur la base de leur hauteur de saut, car le *squat jump* représente une condition sous-optimale de charge pour eux. Ainsi, la performance en *squat jump* dépend certes de  $P_{\max}$ , mais également de l’orientation du profil force-vitesse de l’individu. De ce fait, tous les athlètes présentant un déséquilibre force-vitesse (vers la force ou la vitesse)

présentent des hauteurs de *squat jump* « sous-optimales » pour leur capacité de  $P_{\max}$ . On peut alors dire qu’ils n’exploitent pas toute leur puissance et que la hauteur de saut n’est pas un indicateur fiable de  $P_{\max}$ .

En parallèle, la même étude (Morin *et al.* 2019) a établi que le lien statistique de corrélation entre la  $P_{\max}$  en *squat jump* ou *countermovement jump* et la hauteur de saut atteinte lors de ces tests est limitée chez les athlètes. Dans ces populations, une part faible (< 20 %) de la différence inter-individuelle en  $P_{\max}$  est associée à la différence inter-individuelle de hauteur de saut. Une préparation physique sérieuse, moderne et efficace ne peut pas souffrir d’une telle approximation.

Une amélioration de près de 10 % et conservable plusieurs semaines

Afin d’améliorer la performance en saut vertical (avec ou sans élan), il s’agirait de déterminer le profil force-vitesse de l’athlète, puis de calculer le « profil force-vitesse optimal » et le « déficit force-vitesse », soit le pourcentage d’écart entre les deux. Ces calculs sont donnés directement par la feuille décrite dans la figure 2, et la modulation de la préparation ►

Catégorie de déficit ( $FV_{imb}$ )	Seuils de déficit (valeur absolue en % par rapport au profil optimal de 100 %)	Répartition des charges d'entraînement (Fig. 5)
Déficit en force élevé	< 60	3 Force max
		2 Force-puissance
		1 Puissance max
Déficit en force modéré	60-90	2 Force max
		2 Force-puissance
		2 Puissance max
Profil équilibré	90-110	1 Force max
		1 Force-puissance
		2 Puissance max
		1 Puissance-vitesse
Déficit en vitesse modéré	110-140	1 Vitesse max
		2 Vitesse max
		2 Puissance-vitesse
		2 Puissance max
Déficit en vitesse élevé	> 140	3 Vitesse max
		2 Puissance-vitesse
		1 Puissance max

Tableau 1 – Proposition de répartition des charges d'entraînement (la présentation sous forme de proportions globales la rend adaptable à l'échelle d'une séance, d'un micro ou macrocycle) en fonction de la catégorie de déficit. Les cinq catégories possibles sont établies en fonction de l'écart observé entre profil réel et optimal de l'athlète (Jiménez-Reyes *et al.* 2017b et 2019).

physique pourra alors être indexée, sur une base individuelle, sur le déficit force-vitesse. On divise en pratique l'intégralité du spectre force-vitesse en cinq zones (Fig. 5) : force maximale, force-puissance, puissance maximale, puissance-vitesse et vitesse maximale. De même, cinq catégories de déficit force-vitesse sont déterminées (Tab. 1). Quelle que soit la zone, le travail doit être fait à vitesse maximale, même si cette vitesse est très lente (zone de force maximale). On parle alors d'intention maximale. Le principe de base de cette approche sera donc de faire correspondre le stimulus en termes d'entraînement (quels points améliorer en priorité ? quels points chercher à maintenir ?) au déficit individuel observé. Dans le cas d'un athlète présentant un déficit en force d'environ 40 % (Fig. 2), la modulation de

son entraînement devra contenir des charges induisant une stimulation spécifique de la partie gauche (côté force maximale) de son profil. Il faudra donc envisager un travail d'extension explosive du membre inférieur contre des charges très élevées, permettant au mouvement de se dérouler dans la zone de vitesse (basse) correspondante.

Il est important de noter que la force et la vitesse développées en *squat jump* sans charge additionnelle placent ce « point » du spectre force-vitesse au centre, dans la zone de puissance maximale  $P_{max}$  (Fig. 5). Ceci a une conséquence pratique fondamentale : pour stimuler le côté « vitesse » de la courbe (p. ex., pour corriger un déficit en vitesse), il faudra utiliser des modalités d'exercices induisant ces extensions très rapides. Un *squat jump* représentant ►

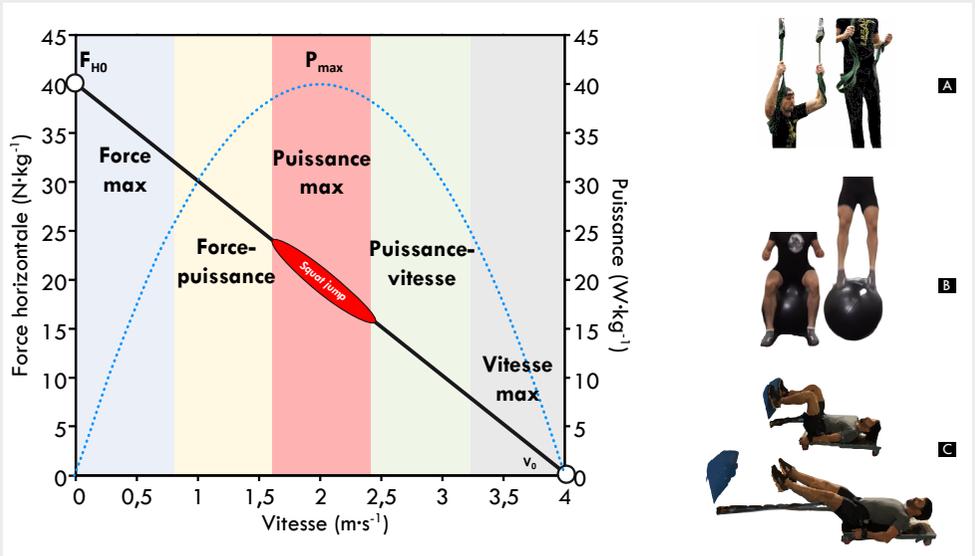


Figure 5 – Exercices et charges pour l'individualisation. En divisant le spectre force-vitesse-puissance en cinq zones, il est possible d'organiser les charges et types d'exercices en respectant le principe de spécificité. Par exemple, un demi-squat à force maximale sera dans la zone « Force max » : poussée très lente mais production de force maximale. Un *squat jump* horizontal proposé par Samozino *et al.* (2018) ou un saut après prise d'élan par la déformation d'un swissball rentreront dans la production de force à haute vitesse (zone « Vitesse max »).

des conditions de force-vitesse « intermédiaires », il sera nécessaire de trouver des stimuli plus rapides (Fig. 3).

Après un entraînement spécifique de neuf semaines, avec cette approche d'individualisation de la programmation en fonction du déficit force-vitesse (Jiménez-Reyes *et al.* 2017b), à raison de deux sessions par semaine d'environ 30 minutes, nous avons observé clairement que le déficit force-vitesse pouvait être réduit, voire corrigé (profil en fin de programme plus proche ou égal au profil optimal), qu'il s'accompagnait d'une

amélioration systématique de la performance en saut (plus de 10 % en moyenne) et, pour certains sujets, de P<sub>max</sub>. Cette étude pilote atteste la pertinence d'une approche modulée individuellement, en fonction des besoins de chaque athlète et profil, par rapport à une démarche standard « taille unique », dans laquelle tous les athlètes suivent le même programme. Récemment, notre équipe a renouvelé ce type d'étude expérimentale (Jiménez-Reyes *et al.* 2019), en cherchant tout d'abord à tester de nouveau notre hypothèse, mais en y ajoutant trois éléments méthodologiques :

- un suivi de la cinétique d'adaptation individuelle (avec changement de groupe et donc de programme pour suivre l'évolution du déficit force-vitesse) ;
- une durée de programme individualisée (jusqu'à atteindre une zone optimale de +/-10 % autour du profil individuel optimal) ;
- une étude de la possible « désadaptation » dans les trois semaines suivant l'atteinte du profil optimal et l'arrêt de cet entraînement spécifique.

Les résultats obtenus ont confirmé ceux de l'étude pilote et ajouté des informations importantes. Il a ainsi été constaté que le temps d'atteinte du profil optimal variait selon les individus, ce qui induit une approche individualisée de la durée des programmes. Le nombre de semaines/séances de travail spécifique était fortement corrélé à la magnitude du déficit force-vitesse : plus le déficit est important plus la durée d'atteinte du profil optimal est longue (trois à plus de vingt semaines dans l'étude). De plus, le contenu du programme doit être adapté semaine après semaine pour suivre l'évolution du déficit force-vitesse selon les recommandations de Jiménez-Reyes *et al.* (2017b). Ensuite, cette étude a montré que lors des trois semaines ayant suivi l'arrêt de l'entraînement spécifique, la performance en saut était globalement similaire et le déficit force-vitesse maintenu dans la zone optimale. Ainsi, en cas de préparation d'une compétition, type tournoi, avec phase de préparation puis d'affûtage, ces résultats suggèrent qu'un profil optimal

peut être conservé quelques semaines sans entraînement spécifique de « maintien » ou « rappel ».

“... la pertinence d'une approche modulée individuellement, en fonction des besoins de chaque athlète et profil...”

### Les doutes d'une approche en « polarisation »

L'établissement du profil individuel force-vitesse-puissance permet donc d'identifier les composantes de la performance et de  $P_{max}$ , et de savoir quelles marges de développement sont envisageables pour chaque athlète. Ce travail peut être mis en place à toutes les étapes du développement physique d'un athlète : détection, développement, maintien en cours de saison, retour de blessure et réathlétisation... Toutefois, l'angle de développement de la zone  $P_{max}$  reste encore incertain. Si nous avons opté ces dernières années pour une approche basée sur la spécificité du stimulus appliqué, c'est-à-dire sur la « vitesse optimale » ▶

et la plage de résistance correspondante à  $P_{max}$ , Jiménez-Reyes *et al.* (2017b, 2019) ont ciblé la zone spécifique de charge et vitesse de  $P_{max}$ , en y adjoignant des exercices destinés à stimuler les autres zones du profil, d'un extrême à l'autre. Cette approche globale nous a semblé justifiée pour développer toutes les composantes de  $P_{max}$ , mais des recherches sont encore nécessaires pour comparer son efficacité à des programmes d'entraînement plus contrastés ou « polarisés » visant un développement de  $P_{max}$  par l'amélioration des qualités de force et vitesse maximales. Ces points, comme par exemple le développement de méthodes d'évaluation des propriétés du membre supérieur (Rahmani *et al.* 2018), sont l'objet de travaux en cours et à venir.

En conclusion, la dernière décennie de recherches en biomécanique du sport a permis, sur la base d'une « variable d'entrée » communément évaluée (la hauteur de saut), d'approfondir l'individualisation du développement des qualités de puissance basé sur le profil force-vitesse individuel. La mise en œuvre de cette approche en situation réelle d'entraînement, sur le terrain, a été potentialisée par le développement d'outils de mesures fiables et précis de la hauteur de saut, permettant à chaque athlète et entraîneur d'expérimenter directement. À vos marques, prêts, sautez ! ■

## Bibliographie

ALCAZAR J, CSAPO R, ARA I et ALEGRE LM, « On the shape of the force-velocity relationship in skeletal muscles: The linear, the hyperbolic, and the double-hyperbolic », *Front Physiol*, 2019, 10. DOI : [10.3389/fphys.2019.00769](https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00769).

BALSALOBRE-FERNÁNDEZ C, GLAISTER M et LOCKEY RA, « The validity and reliability of an iPhone app for measuring vertical jump performance », *J Sports Sci*, 2015, 33(15), p. 1574-1579. DOI : [10.1080/02640414.2014.996184](https://doi.org/10.1080/02640414.2014.996184).

ESCOBAR ÁLVAREZ JA, FUENTES GARCÍA JP, DA CONCEIÇÃO FA et JIMÉNEZ-REYES P, « Individualized training based on force-velocity profiling during jumping in ballet dancers », *Int J Sports Physiol Perform*, 2019, 7, p. 1-7. DOI : [10.1123/ijsp.2019-0492](https://doi.org/10.1123/ijsp.2019-0492).

GARCÍA-RAMOS A, PÉREZ-CASTILLA A, MORALES-ARTACHO AJ, ALMEIDA F, PADIAL P, BONITCH-GÓNGORA J, DE LA FUENTE B et FERICHE B, « Force-velocity relationship in the countermovement jump exercise assessed by different measurement methods », *J Hum Kinet*, 2019, 67(1), p. 37-47. DOI : [10.2478/hukin-2018-0085](https://doi.org/10.2478/hukin-2018-0085).

GARCÍA-RAMOS A, PÉREZ-CASTILLA A et JARIC S, « Optimisation of applied loads when using the two-point method for assessing the force-velocity relationship during vertical jumps », *Sports Biomech*, 2018, p. 1-16. DOI : [10.1080/14763141.2018.1545044](https://doi.org/10.1080/14763141.2018.1545044).

GIROUX C, RABITA G, CHOLLET D et GUILHEM G, « What is the best method for assessing lower limb force-velocity relationship? », *Int J Sports Med*, 2015, 36(2), p. 143-149. DOI : [10.1055/s-0034-1385886](https://doi.org/10.1055/s-0034-1385886).

JIMÉNEZ-REYES P, SAMOZINO P et MORIN JB, « Optimized training for jumping performance using the force-velocity imbalance: Individual adaptation kinetics », *PLoS One*, 2019, 14(5), p. e0216681. DOI : [10.1371/journal.pone.0216681](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0216681).

JIMÉNEZ-REYES P, SAMOZINO P, GARCÍA-RAMOS A, CUADRADO-PEÑAFIEL V, BRUGHELLI M et MORIN JB, « Relationship between vertical and horizontal force-velocity-power profiles in various sports and levels of practice », *PeerJ*, 2018, 6, p. e5937. DOI : [10.7717/peerj.5937](https://doi.org/10.7717/peerj.5937).

JIMÉNEZ-REYES P, SAMOZINO P, PAREJA-BLANCO F, CONCEIÇÃO F, CUADRADO-PEÑAFIEL V, GONZÁLEZ-BADILLO JJ et MORIN JB, « Validity of a simple method for measuring force-velocity-power profile in countermovement jump », *Int J Sport Physiol Perform*, 2017a, 12(1), p. 36-43. DOI : [10.1123/ijssp.2015-0484](https://doi.org/10.1123/ijssp.2015-0484).

JIMÉNEZ-REYES P, SAMOZINO P, BRUGHELLI M et MORIN JB, « Effectiveness of an individualized training based on force-velocity profiling during jumping », *Front Physiol*, 2017b, 7, p. 677. DOI : [10.3389/fphys.2016.00677](https://doi.org/10.3389/fphys.2016.00677).

JIMÉNEZ-REYES P, SAMOZINO P, CUADRADO-PEÑAFIEL V, CONCEIÇÃO F, GONZÁLEZ-BADILLO JJ et MORIN JB, « Effect of countermovement on power-force-velocity profile », *Eur J Appl Physiol*, 2014, 114(11), p. 2281-2288. DOI : [10.1007/s00421-014-2947-1](https://doi.org/10.1007/s00421-014-2947-1).

MAREY EJ, *Le Mouvement*, Éditions Jacqueline Chambon, Arles, 2002.

MARTIN JA, BRANDON SCE, KEULER EM, HERMUS JR, EHLERS AC, SEGALMAN DJ, ALLEN MS et THELEN DG, « Gauging force by tapping tendons », *Nat Commun*, 2018, 9(1592). DOI : [10.1038/s41467-018-03797](https://doi.org/10.1038/s41467-018-03797).

MORIN JB et SAMOZINO P, *Biomechanics of Training and Testing: Innovative Concepts and Simple Field Methods*, Springer International Publishing, Cham, 2018.

MORIN JB et SAMOZINO P, « Interpreting power-force-velocity profiles for individualized and specific training », *Int J Sports Physiol Perform*, 2016, 11(2), p. 267-272. DOI : [10.1123/ijssp.2015.0638](https://doi.org/10.1123/ijssp.2015.0638).

MORIN JB, JIMÉNEZ-REYES P, BRUGHELLI M et SAMOZINO P, « When jump height is not a good indicator of lower limb maximal power

output: Theoretical demonstration, experimental evidence and practical solutions », *Sports Med*, 2019, 49(7), p. 999-1006. DOI : [10.1007/s40279-019-01073-1](https://doi.org/10.1007/s40279-019-01073-1).

PALMIERI G, CALLEGARI M et FIORETTI S, « Analytical and multibody modeling for the power analysis of standing jumps », *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2015, 18(14), p. 1564-1573. DOI : [10.1080/10255842.2014.930135](https://doi.org/10.1080/10255842.2014.930135).

RAHMANI A, SAMOZINO P, MORIN JB et MOREL B, « A simple method for assessing upper-limb force-velocity profile in bench press », *Int J Sports Physiol Perform*, 2018, 13(2), p. 200-207. DOI : [10.1123/ijssp.2016-0814](https://doi.org/10.1123/ijssp.2016-0814).

SAMOZINO P, RIVIÈRE JR, ROSSI J, MORIN JB et JIMÉNEZ-REYES P, « How fast is a horizontal squat jump? », *Int J Sports Physiol Perform*, 2018, 13(7), p. 910-916. DOI : [10.1123/ijssp.2017-0499](https://doi.org/10.1123/ijssp.2017-0499).

SAMOZINO P, EDOUARD P, SANGNIER S, BRUGHELLI M, GIMENEZ P et MORIN JB, « Force-velocity profile: Imbalance determination and effect on lower limb ballistic performance », *Int J Sport Med*, 2014, 35(6), p. 505-510. DOI : [10.1055/s-0033-1354382](https://doi.org/10.1055/s-0033-1354382).

SAMOZINO P, REJC E, DI PRAMPERO PE, BELLI A et MORIN JB, « Optimal force-velocity profile in ballistic movements. *Altius: Citius or Fortius?* », *Med Sci Sports Exerc*, 2012, 44(2), p. 313-322. DOI : [10.1249/MSS.0b013e31822d757a](https://doi.org/10.1249/MSS.0b013e31822d757a).

SAMOZINO P, MORIN JB, HINTZY F et BELLI A, « Jumping ability: A theoretical integrative approach », *J Theor Biol*, 2010, 264(1), p. 11-18. DOI : [10.1016/j.jtbi.2010.01.021](https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2010.01.021).

SAMOZINO P, MORIN JB, HINTZY F et BELLI A, « A simple method for measuring force, velocity and power output during squat jump », *J Biomech*, 2008, 41(14), p. 2940-2945. DOI : [10.1016/j.biomech.2008.07.028](https://doi.org/10.1016/j.biomech.2008.07.028).



**INSTITUT NATIONAL DU SPORT,  
DE L'EXPERTISE ET DE LA PERFORMANCE**

11, avenue du Tremblay - 75012 PARIS

Tél. 01 41 74 41 00

[www.insep.fr](http://www.insep.fr)



**TOYOTA**