

# Centre de gravité en performance en escalade

## 1 INTRODUCTION

L'une des problématiques essentielles de l'entraîneur, quelque soit l'activité, est d'avoir à sa disposition des indices objectifs d'évaluation de la performance de ses athlètes pour pouvoir orienter son action pédagogique dans le temps et planifier l'entraînement. En escalade sportive, que je définis comme la recherche d'accès à une performance maximale, en site naturel ou en compétition<sup>1</sup>, le premier critère est celui de la réalisation de la performance, que ce soit l'enchaînement d'une voie ou l'accès à un podium. Cependant, ce critère de réussite, même s'il est *in fine* le but de toute planification de l'entraînement, n'est guère porteur de sens pour celui qui cherche à développer les facteurs de réalisation de la performance.

L'escalade consiste à déplacer son centre de gravité du bas de la voie vers un point plus haut qui peut être le sommet en SNE ou une hauteur maximale en compétition. Cette trajectoire du centre de gravité est la conséquence du déplacement des différents segments du grimpeur au cours du temps, ou gesticulation du grimpeur. Cette gesticulation répond elle-même à une exigence d'adéquation entre les caractéristiques du support, qu'il soit naturel ou artificiel et les qualités motrices du grimpeur. En d'autres termes, il s'agit de produire une séquence temporelle plus ou moins longue d'actions motrices qui réponde à une gestuelle adaptée à la nature du support, l'inclinaison du support, la qualité des prises, la répartition spatiale de ces prises. Il faut cependant garder à l'esprit que pour réaliser une performance, il existe potentiellement une infinité de trajectoires possibles du centre de gravité. De plus, à chaque trajectoire correspond une infinité de gesticulations possible. L'art de l'entraîneur sera donc de faire émerger chez l'athlète, via des situations pédagogiques et des consignes adaptées, la trajectoire idéale et la gesticulation optimale pour réaliser une performance maximale.

L'entraîneur se trouve donc confronté à deux paramètres sur lesquels il peut travailler : (i) la trajectoire du centre de gravité et (ii) la gesticulation nécessaire pour produire cette trajectoire. Pour chaque paramètre, l'entraîneur aura à faire un choix dans l'ensemble infini des solutions, choix qui correspondra à une solution optimale, c'est à dire qui répondra à des critères objectifs de performance. En ce qui concerne la gesticulation, elle répond à une adéquation entre les qualités physiques du grimpeur et la trajectoire du centre de gravité. Elle est donc multifactorielle et résulte des coordinations interarticulaires, donc des modalités d'activation et de recrutement des muscles qui croisent ces articulations, qui eux mêmes dépendent de l'énergie immédiatement mobilisable, des caractéristiques architecturales des

---

<sup>1</sup> Je distingue volontairement la pratique en SNE (Site Naturel d'Escalade) et la pratique compétitive pour 2 raisons. La première est qu'il n'existe plus de compétition sur SNE. Dès lors, la pratique sportive sur SNE est distincte de la pratique compétitive, sur SAE. La seconde raison est que les règles d'évaluation de la performance sont différentes. Sur SNE, la seule règle qui compte est l'enchaînement de la voie, à vue, flash ou après travail, quelque soit le temps mis pour la réaliser. En compétition, le seul critère de la performance est le classement. Par contre, j'exclue la pratique d'entraînement sur SAE de la performance. En effet, les mécanismes de validation des cotations des voies ne sont pas ceux implicitement utilisés par la communauté internationale sur SNE.

muscles ainsi que de leurs paramètres cinématiques tels que leurs longueurs et vitesses de contraction.

L'objectif n'est pas ici de s'intéresser à cette gesticulation, mais à la cause première de celle-ci, à savoir la trajectoire du centre de gravité. En effet, si cette trajectoire n'est pas optimale, l'énergie consommée par le grimpeur sera si importante que tous les efforts consacrés à la gesticulation n'auront au final que peu d'effet. Avant d'aller plus loin dans la réflexion, je me permettrai au préalable une petite digression sur la notion d'énergie.

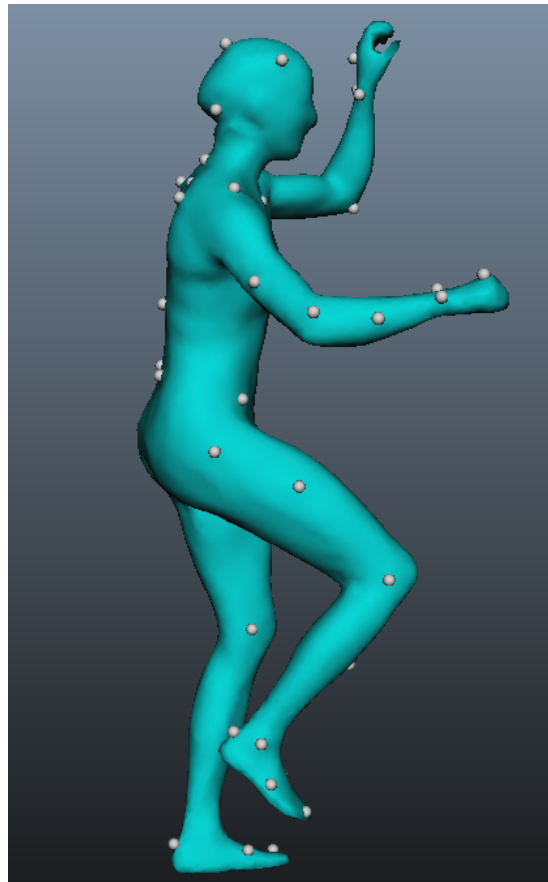
## 2 A PROPOS D'ÉNERGIE ...



**Figure 1.** *Mesure de la consommation d'oxygène en escalade à l'aide d'un analyseur de gaz portable de type Metamax3B (Cortex, Allemagne). D'après Panackova et al., 2014.*

Antoine Lavoisier, scientifique français de la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle avait énoncé cette maxime que nous avons tous entendu un jour au cours de notre scolarité : « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme ». Il en est de même pour l'énergie. Il faut penser l'énergie en terme de flux, et non de gains ou de pertes. Ainsi, quand un grimpeur s'élève, il dépense de l'énergie chimique qui se transforme en énergie mécanique qui existe sous deux formes, à savoir l'énergie cinétique, proportionnelle au carré de sa vitesse de déplacement, et l'énergie potentielle, proportionnelle à la hauteur atteinte. Quand le grimpeur chute, il perd de l'énergie potentielle qui se transforme en énergie cinétique, puisque sa vitesse augmente au cours de la chute. En fin de chute, la chaine d'assurance absorbe cette énergie. Ainsi, il n'y a pas

d'opposition entre énergies chimiques et mécaniques, ce ne sont que les deux facettes d'une même quantité. En escalade, et de manière générale dans les activités physiques et sportives, il est difficile de quantifier les flux énergétiques par la physiologie. En effet, ces mesures nécessitent des appareillages lourds pour évaluer la consommation d'oxygène (Bertuzzi et al., 2007, España Romero et al., 2011, Panackova et al., 2014, Watts & Drobsih, 1998, Watts & Ostrowski, 2014) (Figure 1). Par ailleurs, ces mesures sont indirectes, puisque l'on enregistre des marqueurs de la dépense énergétique (la VO<sub>2</sub> par exemple), et jamais l'énergie par elle-même. Ainsi, pour accéder directement à la dimension énergétique en situation réelle de compétition et sans appareillage particulier, il faut s'attacher à l'analyse mécanique du grimper. Le seul inconvénient est que cette analyse nécessite un formalisme mathématique difficilement accessible au profane.



**Figure 2.** *Modélisation tridimensionnelle d'un grimpeur (Reveret & Legreneur, 2017).*

Deux types d'énergies mécaniques peuvent être distingués :

- L'énergie interne qui est l'énergie nécessaire à la gesticulation du grimpeur. Elle concerne donc les flux entre les muscles, le squelette et les autres éléments qui contribuent aux déplacements des articulations, ou pour lutter contre la pesanteur (ce que l'on appelle la fonction posturale). L'évaluation de cette énergie interne nécessite la modélisation mécanique du grimpeur dans un espace tridimensionnel (Figure 2).
- L'énergie externe qui rend compte des flux d'énergie entre le grimpeur et l'environnement. L'énergie externe est, quant à elle, plus facilement accessible puisque la connaissance de la position tridimensionnelle du centre de gravité du grimpeur suffit à la caractériser. Ainsi, tout déplacement de ce centre de

gravité nécessite une dépense énergétique qui se répartit comme suit : l'élévation induit une transformation de l'énergie interne en énergie potentielle. La vitesse de déplacement induit une transformation en énergie cinétique. Il est à noter que l'énergie potentielle peut elle-même se transformer en énergie cinétique et inversement. Suivre la dépense énergétique externe du grimpeur permet donc d'évaluer une part de la consommation énergétique globale du grimpeur, et donc sa capacité à réaliser une performance. Ce paramètre est donc essentiel pour que l'entraîneur puisse appréhender en temps réel, et ce de manière objective, la performance du grimpeur.

### 3 LA TRAJECTOIRE DU CENTRE DE GRAVITÉ EN ESCALADE

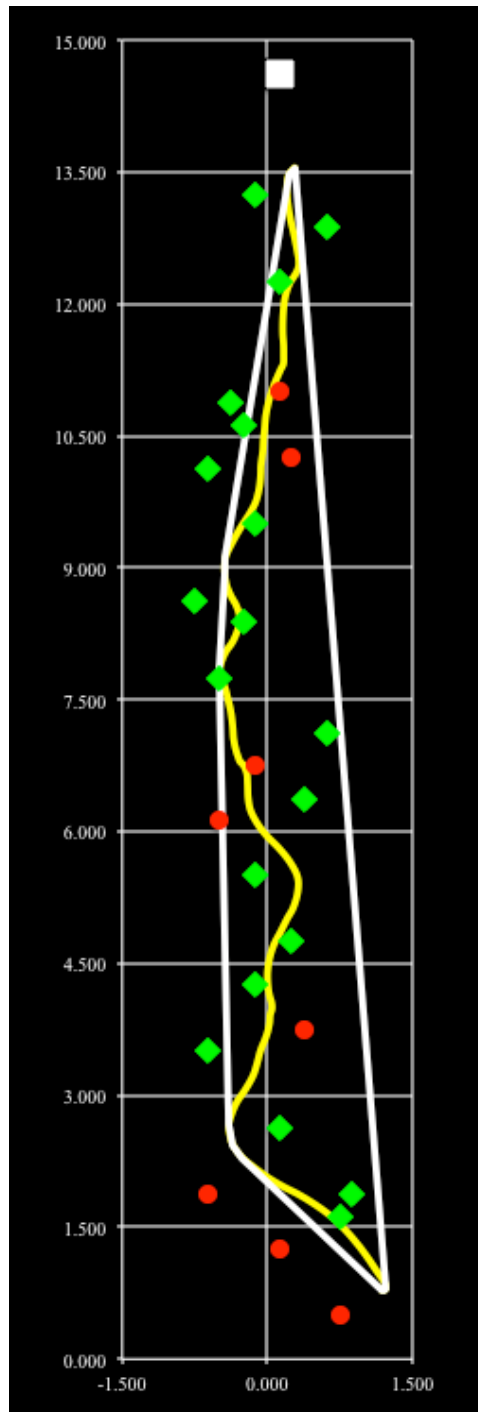


**Figure 3.** Acquisition par drone de la gesticulation du grimpeur en escalade de vitesse (Legreneur, 2017).

Le centre de gravité est défini mathématiquement comme le barycentre des centres de gravité des différents segments constitutifs d'un corps. En d'autres termes, la position tridimensionnelle du centre de gravité dépend de la position des différents segments du grimpeur, et donc de sa posture sur le support. Si le grimpeur est immobile, les bras le long du corps, son centre de gravité est localisé en avant de la 3<sup>ème</sup> vertèbre lombaire et peut être assimilé à son nombril. Cependant, ce cas est extrêmement rare, et le moindre mouvement de n'importe quel segment va induire un déplacement de ce centre de gravité. Pour évaluer la trajectoire du centre de gravité, il faudra donc dans un premier temps procéder à une acquisition du mouvement, c'est à dire filmer le grimpeur au cours de la réalisation de sa performance (Figure 3). Ce film sera alors utilisé pour modéliser la locomotion du grimpeur et donc en déduire la trajectoire du centre de gravité (Figure 4).

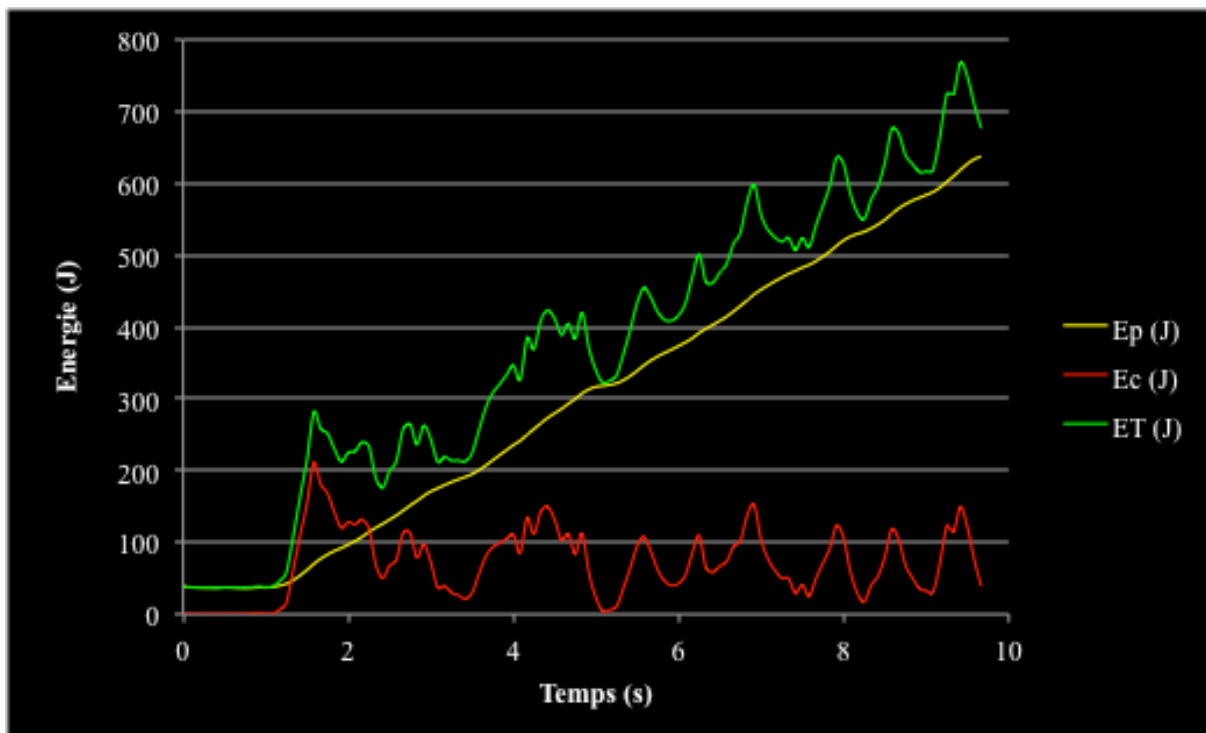
Pour utiliser la trajectoire du centre de gravité sur le terrain, il nous faut des indicateurs objectifs qui nous permettent de l'exploiter. Le premier à avoir travaillé sur ce sujet est Patrick Cordier (1946-1996), grande figure de l'escalade et de l'alpinisme moderne. Il a soutenu sa thèse en neurosciences en 1995 sur le thème « Statique et dynamique d'un

apprentissage moteur : analyse des trajectoires en escalade » (Cordier *et al.*, 1993, 1994a, 1994b, 1996). Dix années plus tard, ces recherches seront reprises par Sibella *et al.* (2007) qui généraliseront les résultats de Cordier en 3D et Watts *et al.* (2016) pour comparer différentes situations d'escalade.



**Figure 4.** Trajectoire du centre de gravité (jaune) et enveloppe de la trajectoire (blanc) en escalade de vitesse. Les marques vertes et rouges indiquent les prises de main et de pied de la voie officielle.

Dans une démarche d'analyse écologique<sup>2</sup> de l'escalade, Cordier a introduit le concept d'entropie pour caractériser la performance d'un grimpeur à partir de la trajectoire de son centre de gravité. De quoi s'agit-il ? L'entropie est un concept thermodynamique qui a été créé en 1865 et qui signifie en grec une action de se transformer. En physique, l'entropie décrit le degré de désorganisation d'un système, et dans le cas qui nous concerne ici, le degré de désorganisation ou de complexité de la trajectoire du centre de gravité. Le degré minimal d'entropie (ou de complexité) est la ligne droite. La dépense énergétique est alors minimale. Toute déviation du centre de gravité par rapport à cette droite va induire une augmentation de la distance parcourue, et donc une augmentation de la dépense énergétique. Cependant, en escalade, les trajectoires sont rarement linéaires et sont imposées par la topologie des prises et la localisation des points d'ancrages. Ainsi, chaque voie aura son propre indice d'entropie minimale. Pour calculer cet indice, les mathématiques fractales ont été utilisées (Mendès France 1981, 1983, 1991). Sans rentrer dans les détails, cet indice va dépendre de la longueur de la trajectoire du centre de gravité (en jaune sur la Figure 4) ainsi que du périmètre de l'enveloppe de la trajectoire (en blanc sur la Figure 4).



**Figure 5.** *Energies potentielle (en jaune), cinétique (en rouge) et totale (en vert) en fonction du temps d'un grimpeur sur la voie officielle de vitesse.*

Outre cet indice d'entropie, qui, nous verrons par la suite, est un marqueur de la performance, la cinématique du centre de gravité nous permet d'accéder à la dimension énergétique de ce dernier (Figure 5). Cette dimension est importante car elle nous donne des informations sur la technique du grimpeur et sa capacité à conserver l'énergie, et donc à optimiser sa performance. L'énergie potentielle nous renseigne sur la variation de hauteur du grimpeur. Si elle est de moindre intérêt en difficulté ou en bloc, elle prend une importance essentielle en vitesse, puisque plus la courbe sera lissée, et plus le grimpeur sera capable de se

<sup>2</sup> Ecologique signifie que l'étude n'est pas réalisée en laboratoire mais sur le site de pratique de l'activité, en SNE ou SAE.



propulser vers le haut avec un minimum d'écarts par rapport à la trajectoire idéale. L'énergie cinétique rend compte de la variation de vitesse du grimpeur. Dans l'idéal, en escalade de vitesse, il faudrait que cette variation soit nulle, et donc que la vitesse soit constante, et donc que l'énergie cinétique le soit également. Ici, nous observons des variations qui sont autant d'indices des marges de progression de l'athlète.

## 4 ENTROPIE ET PERFORMANCE EN ESCALADE

### 4.1 Type de grimpeur et entropie

Pour réussir une voie, il existe toujours une multitude de solutions en fonction des qualités physiques et technique du grimpeur. Ainsi, il est possible de distinguer des stratégies à dominante technique et d'autres à dominante force. Les grimpeurs à dominante technique ont de moindres accélérations au cours du grimper, ce qui signifie que leurs variations de vitesse sont moindres. Il s'en suit la force développée est moindre ainsi que la puissance. Au contraire, les grimpeurs à dominante force présentent de grandes accélérations, et donc des variations de vitesse importantes. Donc, inversement au grimpeur précédent, il développera, selon la seconde loi de Newton, plus de force et donc de puissance. Il s'en suit donc qu'un grimpeur à dominante technique aura potentiellement une durée de déplacement plus importante qu'un grimpeur à dominante force puisque ses flux énergétiques seront inférieurs. Le but de l'entraîneur sera donc d'amener les grimpeurs à glisser vers une dominante technique pour plusieurs raisons :

- en difficulté, la durée de déplacement dans une voie, sans compter les temps de repos relatifs, est en moyenne de 3'30'' au niveau international (données personnelles). Le grimpeur a donc un temps maximal de 3'30'' pour réaliser un maximum de mouvements. Si le grimpeur est à dominante force, ce temps de déplacement sera diminué et il rentrera dans un cercle vicieux puisque pour augmenter ce temps il devra travailler ses qualités physiques, et donc augmenter sa force et/ou ses qualités de résistance, et donc augmenter sa tendance à être à dominante force.
- En bloc, le grimpeur à dominante technique pourra utiliser un plus grand pourcentage de force maximale en tenue de prise ou la propulsion, puisque cette force ne sera pas utilisée pour la fonction posturale.
- En vitesse, le grimpeur à dominante technique aura de moindres variations de vitesse et pourra donc jouer sur la conservation d'énergie pour accélérer du début à la fin de la voie.

L'entropie est révélatrice de ces typologies (Sibella et al., 2007). Ainsi l'entropie est d'autant plus grande que le grimpeur est à dominante force. Cela signifie qu'il n'optimise pas la trajectoire de son centre de gravité et parcourt donc une plus grande distance que le grimpeur à dominante technique. Dès lors, sa consommation énergétique sera plus importante et sa performance chutera.

En résumé, un grimpeur à dominante technique réalise une voie avec moins de déplacements qu'un grimpeur à dominante force. Cela signifie qu'à niveau de force équivalente :

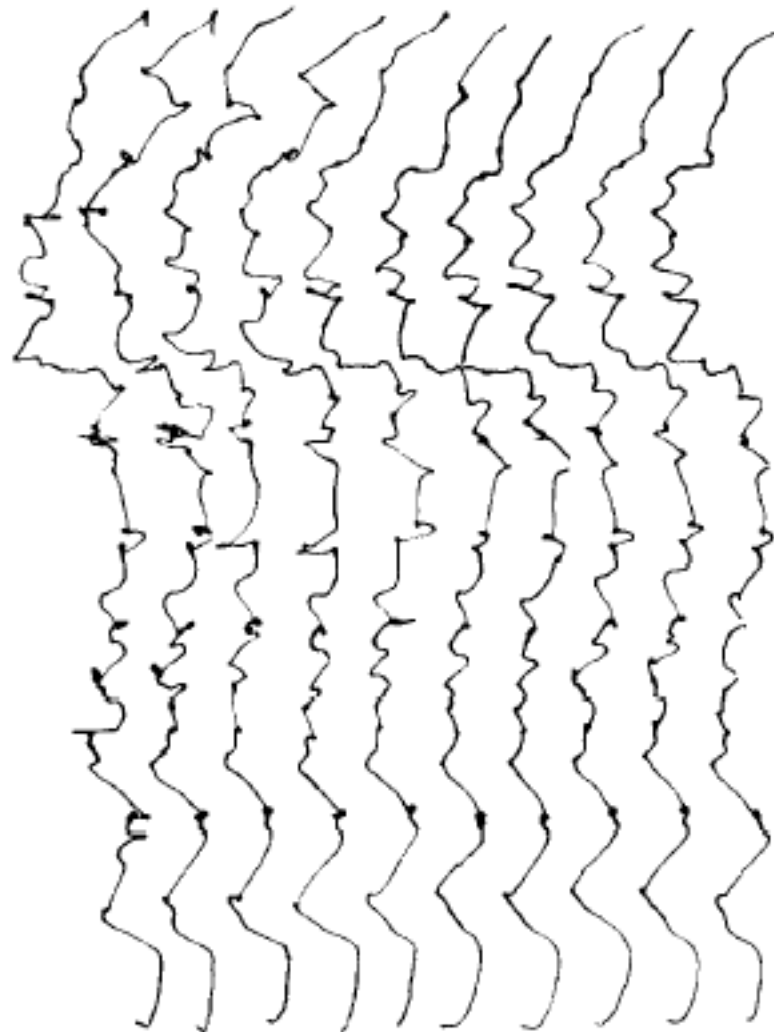
- il ira plus haut dans la voie ;

- il pourra utiliser de plus hauts pourcentages de force maximale dans les mouvements puisqu'il réalisera moins de contractions musculaires que le grimpeur de type force ;
- il aura de moindres variations de vitesse et en conséquence dépensera moins d'énergie qu'un type force ;
- il pourra paradoxalement exprimer plus de force dans une voie qu'un grimpeur fort.

La performance est donc un compromis entre force et technique qu'il s'agit d'utiliser au mieux pour atteindre une performance maximale. Ce compromis diffère selon la spécialité (bloc, difficulté ou vitesse). Par ailleurs, dans le contexte du combiné olympique qui nécessite un compromis entre les qualités nécessaires à la performance dans les trois disciplines, il paraît absolument nécessaire de mettre un accent tout particulier sur ces aspects techniques.

#### **4.2 Niveau de performance et entropie**

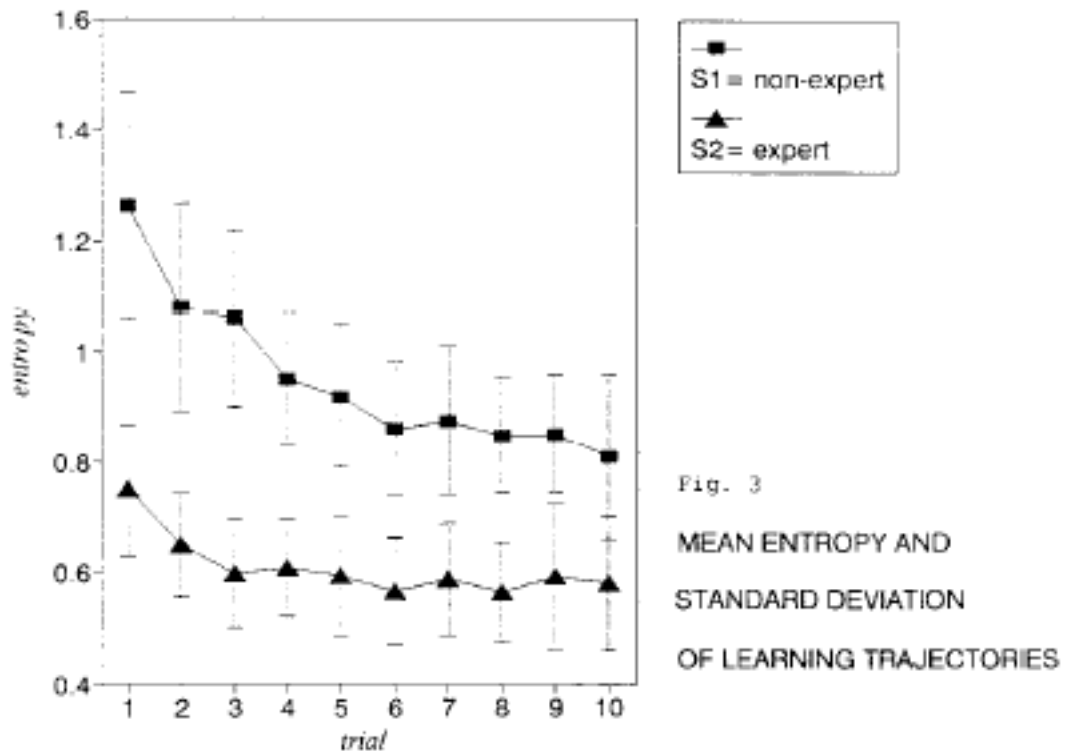
L'entropie est également un indicateur de l'apprentissage en escalade. Ainsi, Cordier et al. (1994) ont démontré que l'indice d'entropie d'un grimpeur diminuait avec la répétition d'une voie jusqu'à atteindre un plateau minimal qui est spécifique à chaque grimpeur en fonction de ses qualités physiques et techniques (Figure 6).





**Figure 6.** Evolution de la trajectoire d'un grimpeur au cours d'un processus d'apprentissage de 10 essais chez un grimpeur non expert (D'après Cordier et al., 1994a)

Par ailleurs, l'entropie dépend du niveau d'expertise (Figure 7). Ainsi, plus le niveau d'expertise est important et plus l'entropie est faible. L'apprentissage moteur agit également différemment avec le niveau d'expertise. En effet, les experts stabilise l'entropie plus rapidement au cours des essais que les débutants.



**Figure 7.** Evolution de l'entropie entre des grimpeurs en fonction du niveau d'expertise et du nombre d'essais (D'après Cordier et al., 1994a)

Ces résultats nous apprennent donc que la réussite d'une voie à l'entraînement ne doit pas être un but en soi, car la réussite n'est pas synonyme d'optimisation de la locomotion d'un point de vue énergétique. Si l'on considère que l'entraînement est le lieu privilégié pour développer ses capacités physiques, techniques et tactico-techniques, l'optimisation de la performance, et donc la réussite de la voie avec une dépense énergétique minimale, doit être prioritairement recherchée. Dès lors, même si la voie a été réussie, il est nécessaire de la répéter jusqu'à ce que la gestuelle la plus économique soit trouvée. L'athlète sera donc amené à mettre en œuvre de nouvelles stratégies locomotrices pour atteindre cette économie. L'entraîneur peut s'aider pour ce faire de stratégies de préfatigue ou d'utilisation de charges additionnelles (au plus 10% du poids de corps) pour aider l'athlète à privilégier la technique à la force.

## 5 CONCLUSION

En conclusion, la trajectoire du centre de gravité d'un grimpeur, quantifiée par son entropie et son énergie mécanique, est un indicateur fiable de la performance en escalade. Elle

permet de discriminer le niveau d'expertise des grimpeurs, d'évaluer leur apprentissage moteur et de distinguer, pour un même niveau de performance, les grimpeurs de type force et ceux de type technique. A une époque où il est de bon aloi d'expliquer la performance par les qualités physiques, il paraît nécessaire de rappeler que la technique joue un rôle essentiel dans la performance en escalade. En d'autres termes, sélectionner des grimpeurs sur le seul critère des qualités physiques est une hérésie dans un sport où ces qualités sont au service de la technique et non le contraire.

## 6 RÉFÉRENCES

- Cassio de Moraes Bertuzzi, R., Franchini, E., Kokubun, E. & Peduti Dal Molin Kiss, M.A. (2007) Energy system contributions in indoor rock climbing *European Journal of Applied Physiology*, 101, 293-300
- Cordier, P., Dietrich, G. & Pailhous, J. (1996) Harmonic analysis of a complex motor behavior. *Human Movement Science*, 15, 789-807.
- Cordier, P., Mendès France M., Bolon, P. & Pailhous, J. (1993) Entropy, degrees of freedom, and free climbing: A thermodynamic study of a complex behavior based on trajectory analysis. *International Journal of Sport Psychology*, 24(4), 370-378.
- Cordier, P., Mendès France M., Bolon, P. & Pailhous, J. (1994a) Thermodynamic study of motor behaviour optimization. *Acta Biotheorica*, 42, 187-201.
- Cordier, P., Mendès France M., Pailhous, J. & Bolon, P. (1994b) Entropy as a global variable of the learning process. *Human Movement Science*, 13, 745-763.
- España Romero, V., Jensen, R.L., Sanchez, X. & Ostrowski, M.L. (2011) Physiological responses in rock climbing with repeated ascents over a 10-week period. *European Journal of Applied Physiology*
- Mendès France, M. (1981) 'Chaotic curves'. In: Rhythms in biology and other fields of application. *Proc. Journ. Sot. Math*, France, Luminy.
- Mendès France, M. (1983) Lecture notes in biomathematics 49. Berlin: Springer-Verlag.
- Mendès France, M. (1991) 'The Planck constant of a curve'. In: J. Belair and S. Dubuc (Eds.), *Fractal geometry and analysis* (pp. 325-366). Dordrecht: Kluwer.
- Panackova, M., Balas, J., Bunc, V. & Giles, D. (2014) Physiological Demands of Indoor Wall Climbing in Children. *2014 IRCRA Congress*
- Sibella, F., Frosio, I., Schena, F. & Borghese, N.A. (2007) 3D analysis of the body center of mass in rock climbing. *Human Movement Science*, 26, 841-852.
- Watts, P.B. & Drobsih, K.M. (1998) Physiological responses to simulated rock climbing at different angles. *Medicine & Science in Sports & Exercise*. 30(7), 1118-1122.
- Wattas, P.B. & Ostrowski, M.L. (2014) Oxygen Uptake and Energy Expenditure for Children During Rock Climbing Activity. *Pediatric Exercise Science*, 26, 49-55.

Watts, P.B., Drum, S.N., Kilgas, M.A. & Phillips, K.C. (2016) Geometric entropy for lead vs top-rope rock climbing. *International Journal of Exercise Science*, 9, 168-174.

Pierre Legreneur

Vice-Président de la Ligue Montagne et Escalade Auvergne Rhône-Alpes

Maître de Conférence HDR, Université de Lyon

Le 12/09/2017