

Etude thermodynamique de la trajectoire du grimpeur

Les travaux que nous menons depuis 1986 sur l'escalade vue comme modèle d'étude de la « pensée motrice », ont d'abord fait apparaître certaines caractéristiques de la stratégie motrice du grimpeur (*Ski et Alpinisme*, 1989, « La signature du grimpeur »). La technique utilise la photographie pour « enregistrer » une trajectoire (G du grimpeur). Dans un parcours « à vue », la « signature » du grimpeur montre une suite de « nœuds » plus ou moins denses, séparés par de brusques résolutions.

Si l'on fait répéter une même voie, les trajectoires forment une famille de courbes : la n ème répétition se stabilise sous une forme achevée, optimisée (vallée de stabilité ou attracteur du paysage moteur).

Les résultats obtenus à l'aide de la technique décrite ci-dessus sont le fruit d'une observation et d'une comparaison des trajectoires. Ainsi on peut reconnaître (avec un peu d'habitude) une trajectoire optimisée, ou même retrouver l'ordre chronologique d'une suite de répétitions lors de l'apprentissage d'une voie. La « signature » du grimpeur porte en elle des indices que le cerveau exercé reconnaît. Mais cette description des niveaux d'expertise ou d'apprentis-

La signature du grimpeur est un signal qui reste à décrypter.

sage reste empirique et il était nécessaire de tenter de formaliser ces observations.

La trajectoire du grimpeur est une signature de son comportement, c'est aussi pour le physicien ou le mathématicien un signal que l'on peut « traiter » et par là, accéder à une « mesure » du comportement.

La problématique était donc de trouver des outils mathématiques aptes à faire émerger les caractères pertinents de ce « signal ». Pour différentes raisons liées à l'expérience personnelle que nous avons de l'activité, nous recherchons une approche globale des phénomènes de motricité « intelligente » que l'on rencontre en escalade.

L'analyse mathématique des courbes ou trajectoires le permet peut-être en révélant des morphologies remarquables caractéristiques des niveaux d'apprentissage.

La température d'une trajectoire

De nombreuses pistes existent. Une observation attentive montre par exemple que les trajectoires optimisées sont moins anguleuses ; ce caractère pourrait être isolé par une analyse des fréquences (transformé de Fourier), ou des rayons de courbure. On peut remarquer également que les premières trajectoires d'une famille sont plus complexes et se contorsionnent en des « points chauds » où le grimpeur « cherche ». On prend alors la trajectoire comme un objet physique permettant la mesure de grandeurs telles que la température ou l'entropie qui lui est liée. Les travaux menés s'orientent actuellement dans cette direction.

Une extension de la thermodynamique des gaz s'applique aux courbes (Hugo Steinhaus). Plus une courbe est « chaude », plus elle se contorsionne. La température d'une droite correspond au zéro absolu et l'entropie est une mesure de la complexité.

On peut ainsi suivre l'évolution de la température ou de l'entropie à travers une famille de trajectoires.

Or la théorie de l'information de Shannon montre une égalité au signe près et à une constante près entre entropie et information, $E + I = C$ (1) d'où l'idée que pendant l'apprentissage d'une voie, la quantité d'entropie qui disparaît d'une trajectoire à l'autre est corrélée à la quantité d'information qui organise le paysage moteur.

Ce procédé d'évaluation de l'information nous paraît intéressant dans la mesure où il se réfère à une grandeur physique déterminée par un comportement. Mais en fait, il s'agit pour nous ici et dans un premier temps, de la mise au point d'un outil et de tester son efficacité à résoudre des problèmes d'évaluation de comportements moteurs en escalade. ■

Patrick Cordier

Dièdre Desmaison, aiguille du Midi

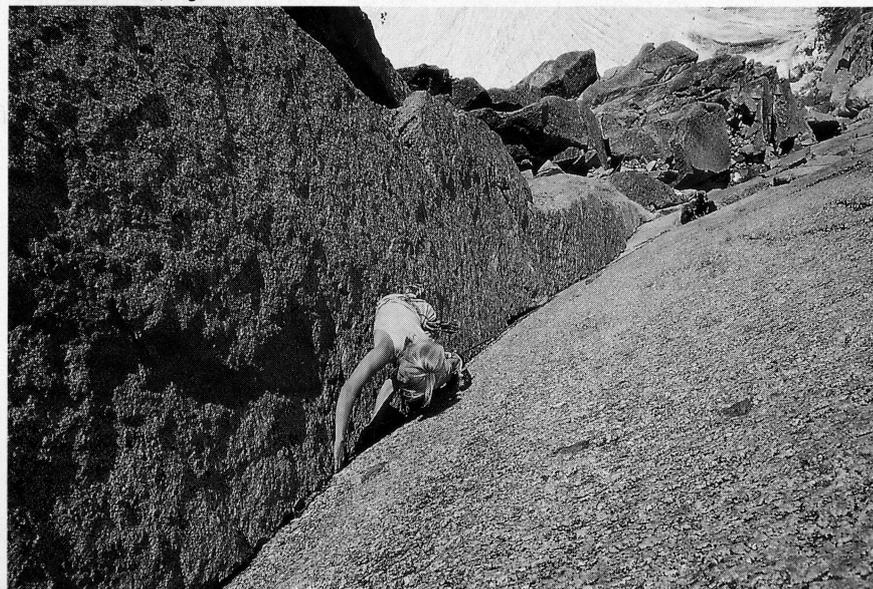
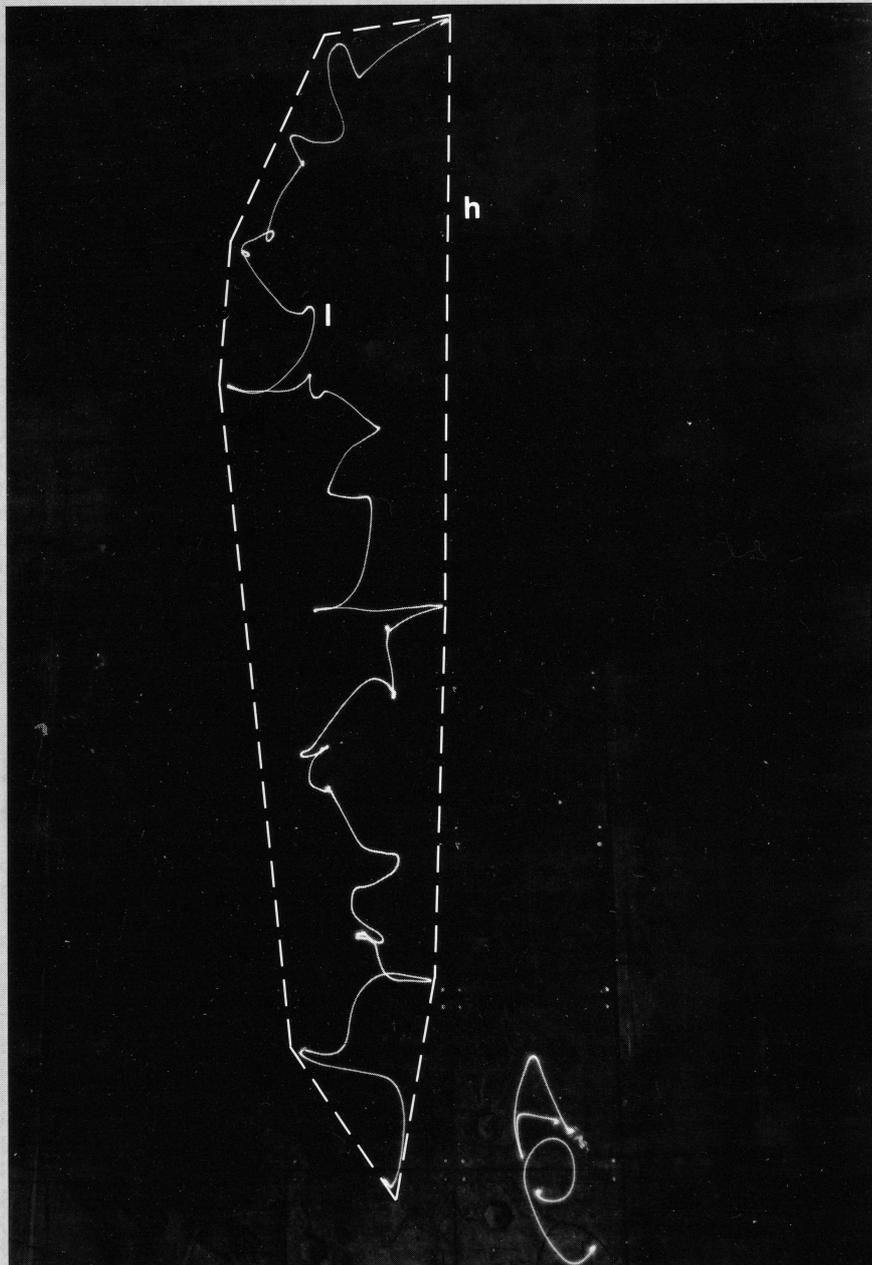


Photo R. Robert

(1) « Pour la science », sept. 90.
« Thermodynamique d'une courbe », p. 110.



PREMIERS RÉSULTATS

L'entropie S d'une trajectoire est donnée par l'équation :

$$\log \frac{2l}{h} + \frac{1}{t(e^{1/t} - 1)}$$

où l est la longueur de la trajectoire, h le périmètre de son enveloppe convexe, et t sa température égale à :

$$1 / \log \frac{2l}{2l - h}$$

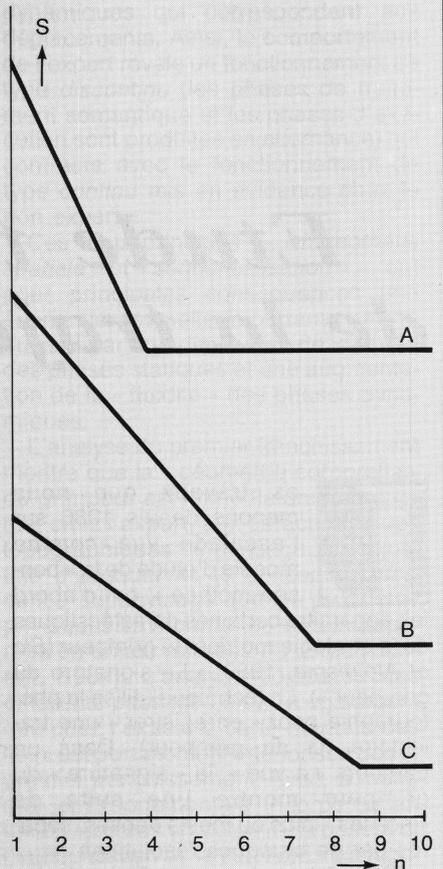
Des tests d'apprentissage ont été effectués au cours de plusieurs expériences sur le mur de l'ENSA où il était demandé à des grimpeurs de niveaux différents de répéter 10 fois la même voie.

Trente enregistrements photographiques de la trajectoire ont ainsi été effectués dans les mêmes conditions et sur la même voie (6c) par :

- 1 grimpeur de très haut niveau
- 1 grimpeur expert
- 1 grimpeur niveau 7a.

Les mesures (longueur de la trajectoire et longueur de l'enveloppe convexe) et le calcul des équations donnant l'entropie et la température de la trajectoire, ont été faites pour trois séries de 10 répétitions et montrent clairement une décroissance de l'entropie d'un essai à l'autre, l'entropie la plus basse correspondant à la trajectoire optimisée. D'autres résultats intéressants restent à confirmer.

Pour l'étude préliminaire, la mesure et le calcul ont été faits à la main et prennent beaucoup de temps. Afin de développer cet outil et son utilisation, il a été demandé à Philippe Bolon, maître de conférences à l'université de Savoie et attaché au Laboratoire d'Automatique et Micro-Informatique Industriel (LAMII) d'Annecy, de mettre en œuvre un logiciel capable de mesurer la longueur de la trajectoire et de son enveloppe et d'en déduire sa température et son entropie.



■ Profil entropique de trois familles de trajectoires.

S = entropie de la trajectoire

n = nombre de répétitions

A = grimpeur de niveau 8a

B = grimpeur de niveau 7b

C = grimpeur de niveau 7a.

Voie de niveau 6c.

Au cours de l'apprentissage, les « nœuds » que l'on rencontre sur les premiers parcours se résolvent et la longueur de la trajectoire décroît, ceci d'autant plus vite que le grimpeur est expert. Alors que h , l'enveloppe convexe reste quasi constante, l'entropie S et la température t décroissent jusqu'à un plateau où l'on peut dire que la trajectoire est dans un état stable.

Il peut sembler paradoxal que l'entropie décroisse au cours de l'optimisation motrice, alors qu'elle semble croître avec le niveau d'expertise (altitude de départ de $A > B > C$). Ce dernier résultat, obtenu sur trois sujets de niveaux différents reste cependant à confirmer.

Notre hypothèse, issue d'une connaissance empirique de l'activité, est que la trajectoire du grimpeur est d'autant plus ample (on pense à l'amplitude d'une onde) que le grimpeur est expert et utilise au maximum les possibilités « géométrique » et dynamique de son corps. On pourrait parler ici d'un « degré de liberté » du corps dans la pratique de l'escalade « libre ».

Le grimpeur expert se meut dans un « couloir » plus large autour du profil de la voie et sa trajectoire en est d'autant plus longue. On touche ici à l'aspect qualitatif de la performance où le critère d'excellence est dans le minimum d'énergie dépensée. On sait que pour gravir une côte il est plus commode de faire des lacets et que la plus mauvaise des trajectoires serait la ligne droite, signe que le grimpeur « grimpe tout en force ».