

# MODELISATION DE L'ENTRAINEMENT CHEZ L'HOMME

## Evaluation des paramètres d'aptitude et de fatigue

### Simulation

J.C. CHATARD

Laboratoire de Physiologie  
GIP Exercice  
Faculté de Médecine de Saint-Etienne  
15 Rue Ambroise Paré  
42023 Saint-Etienne Cédex 2

*Chez l'homme, la relation qui lie la quantité d'entraînement à la performance est le plus souvent établie de façon empirique à partir de critères simplifiés tels que le nombre d'heures d'entraînement, le nombre de kilomètres parcourus par séance ou l'intensité relative des exercices pratiqués. Cette relation est établie de façon empirique d'une part parce qu'il est difficile de quantifier de façon précise les différentes intensités et le volume d'entraînement des sportifs, d'autre part parce qu'il n'existait pas jusqu'à ces dernières années de modèle mathématique permettant l'analyse des relations entre l'entraînement et la performance.*

### INTRODUCTION

En 1975, Banister et ses collaborateurs ont proposé un modèle mathématique postulant que la performance physique d'un sujet est l'addition de deux fonctions : une fonction positive appelée "aptitude" représentant la capacité d'un sujet à améliorer les fonctions de son organisme et une fonction négative, la "fatigue", représentant la capacité inverse. La cohérence de ce modèle en fait, pour différents auteurs, un bon moyen d'étude des réponses biologiques à l'entraînement (Busso et col., 1992). Ces auteurs ont en effet trouvé des relations significatives entre le niveau d'aptitude calculé et les sécrétions hormonales en testostérone ou LH chez des haltérophiles. Ces relations n'auraient jamais pu être objectivées sans l'utilisation du modèle mathématique. De la même manière, Candau et col. (1992) ont montré que la charge de travail calculée par le modèle pouvait être mise en relation avec les paramètres hématologiques d'un groupe de skieurs de fond.

Aujourd'hui, la modélisation de l'entraînement chez l'homme s'effectue schématiquement en plusieurs étapes.

**Première étape :** la charge d'entraînement est quantifiée selon des paramètres spécifiques à chaque sport.

**Deuxième étape :** modélisation d'une relation entre la charge d'entraînement et les performances mesurées en compétition est recherchée à l'aide d'un modèle mathématique. Lorsque

la relation est significative, on passe à la troisième étape.

**Troisième étape :** les profils d'aptitude et de fatigue sont calculés à partir des paramètres du modèle.

**Quatrième étape :** Les profils d'aptitude et de fatigue sont interprétés à partir des données de l'entraînement dans le but d'adapter celui-ci à chaque individu.

Pour donner un exemple concret de modélisation avec les applications pratiques, un nageur de compétition, BG, a été étudié sur une période de 29 semaines. BG était âgé de 26 ans. Son record au 100 m papillon en bassin de 25 m était de 53 s 25.

### QUANTIFICATION DE L'ENTRAINEMENT

#### Description de l'entraînement

Les 29 semaines d'entraînement de BG ont été décomposées en 4 grandes périodes comprenant 8 semaines de préparation générale (Période I), 8 semaines de préparation spécifique (Période II), 9 semaines de préparation précompétitive (Période III), 4 semaines de préparation terminale (Période IV) en vue des Championnats de France, semaine 29. Parmi les 27 variables quotidiennement recueillies par les entraîneurs, 7 seulement ont été retenues pour le calcul de la charge totale d'entraînement. La première a été le nombre de kilomètres nagés chaque jour. Cinq autres variables ont

permis de classer chaque exercice selon le niveau d'intensité.

Les exercices de niveau I étaient des exercices aérobies sans accumulation de lactate au cours du temps, la vitesse de nage était lente. Tous les exercices d'échauffement ou de récupération active ont été classés dans cette catégorie.

Les exercices de niveau II étaient des exercices proche du seuil d'accumulation des lactates sanguins dont la vitesse a été déterminée par la méthode des paliers successifs (Chatard et Paulin 1985).

Les exercices de niveau III étaient des exercices super-aérobie, dont la vitesse était supérieure au seuil mais avec un temps total de nage supérieur à 2 mn pour que le métabolisme aérobie ait le temps d'être mis en jeu.

Entre chaque exercice, les repos étaient courts (< 30 s) pour éviter la décroissance du métabolisme aérobie.

Les exercices de niveau IV étaient des exercices anaérobie lactique, intenses, mais ne dépassant pas 2 à 3 mn pour éviter la mise en jeu du métabolisme aérobie. Entre chaque exercice les repos étaient longs (> 30s) pour favoriser la décroissance du métabolisme aérobie. Les exercices de niveau V étaient des exercices de sprint réalisés sur une distance de 25 ou 50 m. Ces exercices étaient les plus intenses possible, séparés par des repos plus longs (> 2 mn). La septième variable a quantifié la durée en heures des séances de musculation à sec.

D'autres paramètres spécifiques de

l'entraînement ont été quantifiés et mis en relation avec l'évolution des performances sans pour autant entrer dans le mode de calcul de la charge d'entraînement. Chaque semaine ont été ainsi mesurés, le nombre de demi-journées de repos, la part relative des exercices des membres supérieurs et inférieurs, de nage complète, de 4 nages ou de spécialité et les distances qui étaient parcourues en bassin de 25 m ou 50 m.

### Calcul de la charge d'entraînement

Pour calculer la charge totale de travail, la difficulté est de pondérer chaque exercice par un coefficient représentant l'intensité de l'exercice. Le plus souvent, le coefficient de pondération est calculé empiriquement. Par exemple chez BG, 5 facteurs de pondération de l'intensité ont été calculés arbitrairement en fonction des cinq niveaux de travail précédemment décrits : niveau I, coefficient 1 ; niveau II, coefficient 1,5 ; niveau III, coefficient 2 ; niveau IV, coefficient 2,5 ; niveau V, coefficient 3. Pour la musculation à sec, il a été considéré également de façon plus ou moins arbitraire qu'en moyenne une séance d'une heure était composée de 50 % de niveau I (étirements, échauffements), 25 % de niveau IV et 25 % de niveau V et que cela correspondait à un total de 4 000 m dans l'eau. Le profil des charges d'entraînement est représenté dans la figure 1A.

## MODELISATION

### Mesure de la performance

Au cours des 26 semaines d'entraînement, BG a nagé un 100 m papillon en compétition 15 fois. Seules ces performances ont été prises en compte pour valider la pertinence du modèle et pour comparer les variations de performances calculées par le modèle aux variations réelles de performance.

### Modélisation de la performance

Le modèle mathématique est appliqué aux données concernant les quantités d'entraînement et l'évolution de

la performance. Ce modèle considère l'athlète comme une boîte noire (système) dont la sortie est la performance (Banister et coll., 1975). Les quantités d'entraînement constituent l'entrée du système. Les relations entre l'entrée et la sortie du système peuvent être décrites à partir d'une fonction de transfert du second ordre (Morton et coll., 1990, Busso et coll., 1992). Ce modèle conduit à de simples équations récursives. La performance au jour  $i$  est estimée directement à partir des charges d'entraînement  $w_1$  à  $w_{n-1}$  par :

$$\hat{p}^n = a^* + \sum_{i=1}^{n-1} (k_a \cdot e^{-(n-i)/t_a} - k_f \cdot e^{-(n-i)/t_f}) \cdot w_i$$

où  $k_a$  et  $k_f$  sont deux coefficients de proportionnalité ;  $t_a$  et  $t_f$  sont deux constantes de temps de décroissance et  $a^*$  est une aptitude de base, correspondant au niveau de performance atteint sans entraînement. Dans la présente étude, les paramètres initiaux de fatigue et d'aptitude sont supposés être nuls. Les paramètres du modèle sont déterminés individuellement par l'ajustement des performances estimées aux performances réelles  $p_n$ , en minimisant la somme des carrés résiduels. Le modèle se résout par une technique dérivée de la régression multiple appliquée à des valeurs successives de  $t_a$  et  $t_f$ . Les paramètres  $a^*$ ,  $k_a$ ,  $k_f$ ,  $t_a$  et  $t_f$  obtenus par cet ajustement sont utilisés ensuite dans le calcul des profils de fatigue et d'aptitude. La méthode utilisée est celle proposée par Busso et coll. (1992). L'effet d'une charge d'entraînement réalisée au jour  $i$  a un effet sur le niveau de performance du jour  $n$  quantifié par :

$$E(i/n) = (k_a \cdot e^{-(n-i)/t_a} - k_f \cdot e^{-(n-i)/t_f}) \cdot w_i$$

Si  $E(i/n)$  est positif, il sera considéré comme un gain d'aptitude. Inversement, si  $E(i/n)$  est négatif, il sera assimilé à une augmentation du niveau de fatigue.

Les niveaux de fatigue et d'aptitude sont ainsi déterminés par récurrence par :

$$f^n = \sum_{i=1}^{n-1} |E(i/n)|, \text{ si } E(i/n) < 0,$$

$$a^n = \hat{p}^n - f^n$$

où  $a^n$  et  $f^n$  sont respectivement les niveaux d'aptitude et de fatigue au jour  $n$ .

La performance est la différence entre ces niveaux d'aptitude et de fatigue.

La figure 1C présente les performances réelles et les ajustements de la performance calculée à partir du modèle. Les ajustements sont significatifs ( $r = 0,90$  ;  $P < 0,01$ ) ce qui autorise le calcul des profils d'aptitude et de fatigue.

### CALCUL DES PROFILS D'APTITUDE ET DE FATIGUE

Les tracés obtenus à partir du modèle sont représentés par les figures 1B et 1D. Pour BG, l'aptitude augmente régulièrement durant les périodes de préparation générale et de préparation spécifique (jusqu'à la semaine 16) et se maintient durant les périodes précompétitive et compétitive. La fatigue augmente rapidement deux fois sur une courte période de 3 semaines, de la 4ème à la 6ème semaine et de la 10ème à la 12ème semaine, puis se maintient à un niveau réduit de moitié de la 17ème à la 29ème semaine.

### INTERPRETATION DES PROFILS D'APTITUDE ET DE FATIGUE.

Pour BG, les variations de performance sont principalement liées au nombre de demi-journées de repos ( $r = 0,67$  ;  $P < 0,01$ ; Figure 2A) et au travail des membres supérieurs ( $r = 0,60$  ;  $P < 0,01$ ; Figure 2B). L'incorporation du kilométrage dans la régression augmente le coefficient de corrélation ( $r = 0,87$  ;  $P < 0,01$ ), pour une quantité de repos donnée, les performances régressent lorsque le kilométrage augmente. Malgré tout, la fatigue cumulée de BG sur les 12 dernières semaines d'entraînement n'a représenté que l'équivalent d'une perte de 35 cm sur la distance nagée en une minute de compétition (Figure 1D). Autant dire que le sujet n'est pratiquement pas fatigué. L'interprétation de ce type de résultats doit cependant rester prudente. En effet, dans l'analyse statistique des corrélations, 14 semaines ne sont pas prises en compte étant donné l'absence de performances mesurées au cours de ces semaines d'entraînement. En revanche cette remarque ne peut pas être faite au modèle qui ajuste les performances en

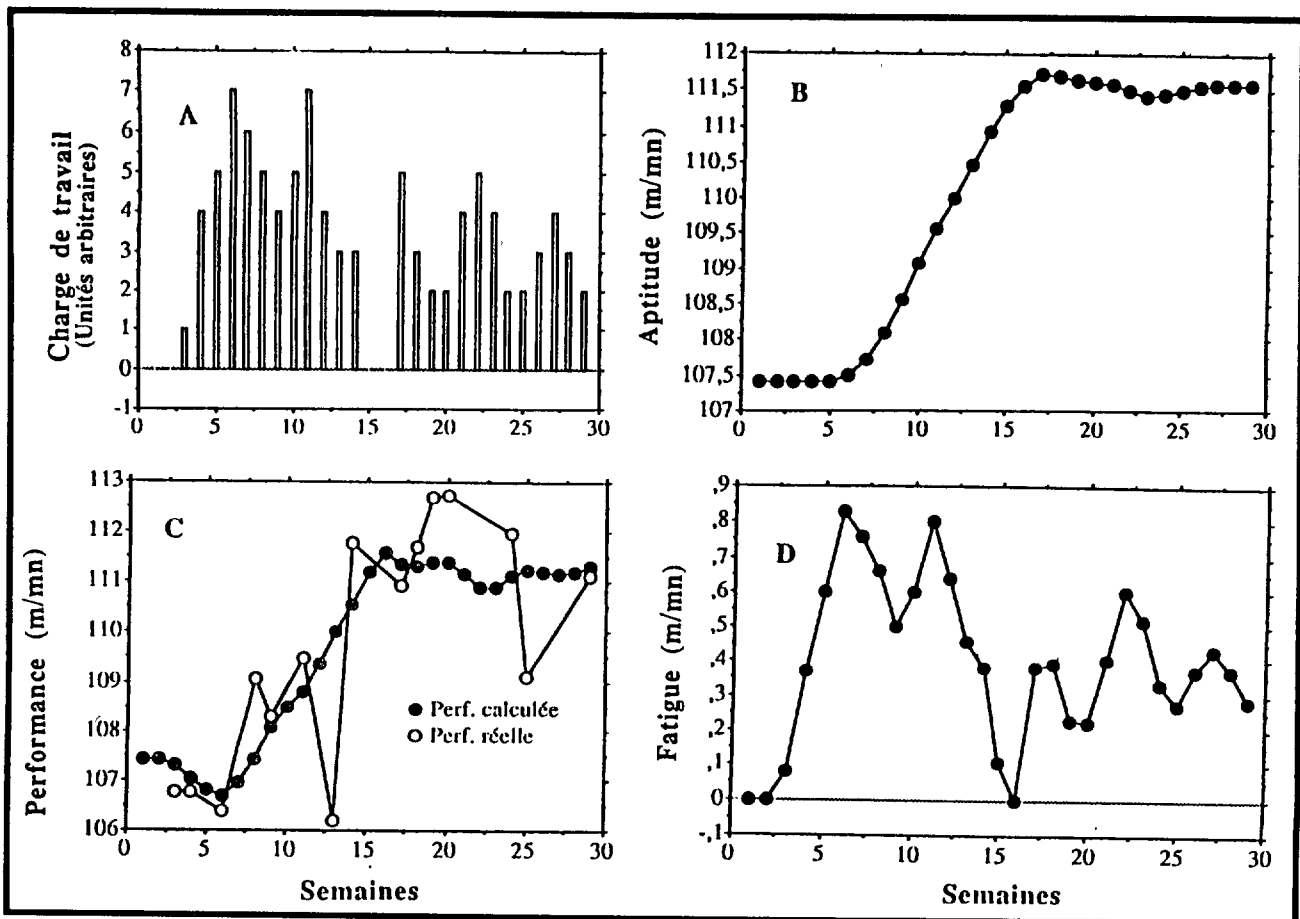


Fig.1 : Représentation graphique des charges d'entraînement, des performances mesurées en compétition et des performances calculées par le modèle chez BG (A et C), représentation graphique des profils d'aptitude et de fatigue calculés chez BG (B et D).

fonction de la charge de travail de chaque semaine.

### CONCLUSION

Le principal avantage du modèle est de proposer une méthode de quantification globale de l'entraînement associée à un calcul des profils d'aptitude physique et de fatigue. Malgré tout ce modèle peut être critiqué. En effet, son principe est de postuler qu'à une charge donnée de travail correspond toujours une même aptitude ou une même fatigue ce qui n'est probablement pas le cas. Un état de fatigue peut, par exemple, amplifier l'effet négatif de l'entraînement. Un autre inconvénient est que la modélisation nécessite des prises de performances régulières et en nombre suffisant (supérieur à 10) pour que l'ajustement des performances calculées à partir du modèle soit statistiquement significatif. La participation régulière à des compétitions sur une même distance et dans des situations comparables n'est certainement pas quelque chose d'aisé à met-

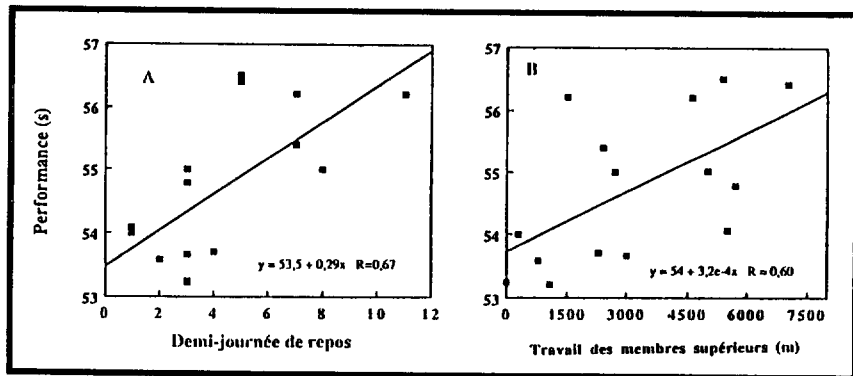


Fig.2 : Relation entre la performance, le nombre de demi-journées de repos et le travail des bras chez BG (A et B) et la performance.

tre en place chez l'homme comme chez le cheval.

### BIBLIOGRAPHIE

- 1 - BANISTER, E.W., CALVERT T.W., SAVAGE M.V. and BACH T. - A systems model of training for athletic performance. *Aust J. Sports Med.*, 1975, 7 : 57-61.
- 2 - BUSSO, T., HAKKINEN K., PAKARINEN A., KAUKANEN H., KOMI P.V. and J.R. LACOUR. - Hormonal adaptations and modelled responses in elite weightlifters during 6 weeks of training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1992, 64 : 381-386.
- 3 - CANDAU R., BUSSO, T. et LACOUR J.R. - Effects of training on iron status in cross-country skiers. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 1992, 64 : 497-502.
- 4 - CHATARD J.C. et PAULIN M. - Intérêt des mesures de lactate sanguin dans le suivi physiologique des performances de T. FAHRNER en 1983 - 1984. *Revue Nages du Collège des entraîneurs français*, 38: 13 - 14.
- 5 - MORTON R.H., J.R. FITZ-CLARKE et E.W. BANISTER. Modeling human performance in running. *J. Appl. Physiol.*, 1990, 69 : 1171-1177.