

Téléchargez gratuitement notre nouveau logiciel pour calculer votre VO_2 max, votre endurance et votre capacité anaérobie grâce à des courses en côte.

Dans un numéro précédent, nous vous proposons d'évaluer vos aptitudes énergétiques en réalisant des chronos sur terrain plat. Voici une version du logiciel -encore plus précise- pour tous ceux qui aiment courir dans les bosses ou s'entraîner en montagne.

Une question de gravité

Sans forcément être masochistes, beaucoup de coureurs à pied reconnaîtront que leur plaisir est proportionnel à la peine et que la course en montagne recèle dès lors des trésors que l'on ne rencontre que très rarement sur le plancher des vaches. Quoi de plus beau en effet qu'un parcours bosselé? Et que dire de la montagne? Rien ne rivalise en effet avec ce sentiment d'euphorie lorsqu'à l'issue d'une épuisante ascension, on débouche soudain à hauteur des cimes. Plus bas dans la vallée, votre copain Marcel ne manifeste pas le même enthousiasme. Il tente toujours de retrouver son souffle entre deux jérémiades et trois jurons. Chacun ses plaisirs.

Ne perdons pas trop de temps à se persuader les uns les autres et examinons plutôt les nombreux avantages qu'offre le nouvel outil informatique que nous mettons à la disposition des coureurs auxquels un peu de dénivelé ne fait pas peur. Téléchargement gratuit sur le site sport-et-vie.com

Attention à la descente

Comme dans l'article intitulé *L'arbre des possibles* (*), ce logiciel permet d'évaluer son profil énergétique sur la base des trois grandes composantes de la performance: VO_2 max, capacité anaérobie et endurance. Pour cela, il suffit d'exhumer d'an-

L'adret difficile!





Des coureuses
à la mode excentrique

ciennes performances en côte ou de tenter d'en établir de nouvelles en vous chronométrant sur des parcours soigneusement choisis. Dans un premier temps, vous pourrez vous tester sur une dénivellation d'une centaine de mètres, ce qui ne vous prendra guère plus que quelques minutes. Ensuite, passez à des objectifs plus ambitieux: 500 mètres, 1000 mètres, voire 2000 mètres. Attention, n'établissez pas tous vos records la même journée. Les résultats seraient biaisés par la fatigue. Mais n'attendez pas trop longtemps non plus entre les performances. L'organisme possède des facultés étonnantes de récupération d'un jour à l'autre, du moins tant que l'on ne lui cause pas de dommages musculaires trop importants. Petite parenthèse: pour éviter ces derniers, il suffit de redescendre sagement en évitant les longues courses échevelées sur les pentes négatives car le travail excentrique des cuisses -on freine sa propre masse à chaque foulée- entraîne nécessairement l'apparition de micro-traumatismes au sein des muscles avec des douleurs qui perdurent

plusieurs jours après la performance. Sans compter les problèmes ostéo-articulaires qui risquent de survenir et qui nécessitent alors des semaines, voire des mois, pour se résorber totalement. Il faut donc éviter ce genre de sollicitations. Sauf, bien sûr, s'il s'agit de vous préparer pour une épreuve de montagne qui comprend des ascensions, mais aussi des descentes. On doit alors procéder avec prudence en comptant sur les facultés du muscle à mettre en mémoire toutes les misères qu'on lui fait subir et sur les possibilités qui lui sont heureusement données de s'adapter chaque fois dans le sens d'une plus grande robustesse. En l'occurrence, on observe un renforcement du tissu conjonctif grâce à la multiplication des fibres de collagène dont la résistance dépasse celle de l'acier! Les muscles traumatisés apprennent aussi à se gonfler d'eau au lendemain d'un effort intensif ce qui leur permet, semble-t-il, de limiter la casse. La sensation d'engorgement que l'on désigne par l'expression "*grosses cuisses*" possède donc une réalité physiologique. A notre connais-

sance, toute la lumière n'a pas encore été apportée sur les mécanismes intimes de ce type d'adaptation. Mais dans la pratique, on sait que le corps trouve le moyen de préserver son intégrité alors même qu'on le soumet au pire des traitements comme, par exemple, lors de ces longues courses en descente.

Quelle altitude fait-il?

Revenons à notre test pour souligner une chose évidente, à savoir que la validité des résultats dépendra évidemment de l'exactitude des données. S'agissant du dénivélé, il suffit de se référer à une simple carte IGN. On peut aussi acheter une montre pourvue d'une fonction altimètre. Ou alors se dénicher un petit baromètre. Cet engin est capable de repérer les très faibles changements de pression atmosphérique qui caractérisent la prise d'altitude. Le chimiste suédois Niels Bohr s'est rendu célèbre pour n'avoir pas voulu utiliser la formule qui permet d'établir

(*) Lire *Sport et Vie* n°92, pages 40-45

ENTRAÎNEMENT

la relation entre ces deux grandeurs (voir encadré ci-dessous). Mais d'autres physiciens célèbres ont associé leur nom à cette relation. Dans son traité du vide, Pascal relate son ascension du Puy de Dôme avec un baromètre à colonne de mercure sous le bras qui lui avait permis de démontrer de façon simple et irréfutable la diminution du poids de la colonne d'air qui pèse sur notre tête à mesure que l'on gagne de la hauteur. Dans notre petit logiciel, nous avons glissé un module spécifique qui permet précisément d'évaluer cette dénivellation en fonction

d'une variation de pression barométrique. Dernière recommandation, si vous empruntez le baromètre qui trône sur la cheminée de votre grand-mère, prenez tout de même soin de ne pas le brutaliser. Elles sont fragiles, ces bêtes-là.

Tout est bon, pourvu que ça monte

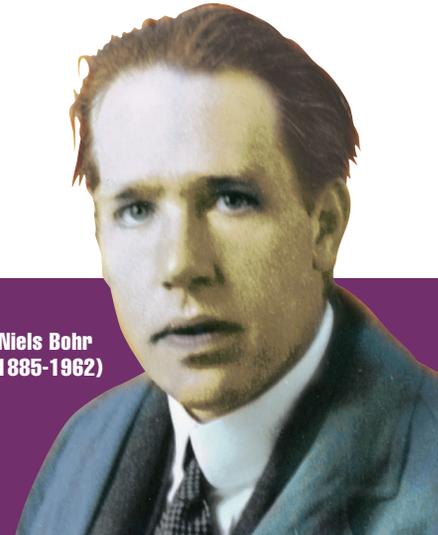
La nature de l'itinéraire revêt aussi de l'importance. Pour les besoins de ces petits tests chronométrés, il est préférable de retenir un profil raide et régulier et

d'éviter les parcours avec des portions planes ou descendantes ce qui, le cas échéant, nécessiterait d'introduire des facteurs correctifs dans le calcul. L'idéal consiste à trouver une pente à 20-30% de

>> LA FABLE DU BAROMÈTRE ET DE LA TOUR

La relation entre la pression atmosphérique et l'altitude est à l'origine d'une des plus célèbres anecdotes scientifiques du début du XX^e siècle. Elle met en scène un étudiant suédois, Niels Bohr, qu'un de ses professeurs avait mis au défi de trouver un moyen pour évaluer la hauteur d'une tour à l'aide d'un baromètre. La réponse attendue devait évidemment tenir compte de la réduction de pression de 0,09 bar (soit 9000 Newton/mètre²) chaque fois qu'on gagne 1000 mètres d'altitude. Il suffit alors de faire la différence entre les mesures relevées en haut de la tour et au niveau du sol (+/- 1,013 bar) pour trouver la solution. Mais la ficelle était trop grosse pour l'esprit rebelle de Niels Bohr qui choisit de résoudre l'énigme d'une tout autre manière. "On attache le baromètre à une corde", expliqua-t-il après quelques secondes de réflexion. "Du haut de la tour, on le laisse pendre dans le vide jusqu'à toucher le sol. Ensuite, on le remonte et on mesure la longueur de la corde". Le professeur était tenté de lui coller un zéro mais comme la réponse était exacte du point de vue technique, il lui octroya une deuxième chance avec pour mission cette fois d'utiliser ses connaissances en physique. Niels Bohr prit quelques minutes pour réfléchir puis, sans notes, se présenta devant lui en s'excusant à l'avance de la longueur des explications. "Il existe tellement de façons de procéder." De plus en plus interloqué, le professeur le mit au défi de lui en présenter au moins une. "C'est simple. On laisse tomber le baromètre du haut de la tour en chronométrant son temps de chute. Ensuite, on utilise la formule: $E = at^2/2$." Là encore, la solution convenait au problème (si l'on néglige les résistances aérodynamiques) mais la perte du baromètre la rendait coûteuse sur le plan pratique. Niels Bohr poursuivit donc sur sa lancée: "Un jour de grand soleil, du sommet de la tour, on peut aussi placer

le baromètre au dehors et mesurer la longueur de son ombre projetée sur le sol. On en déduit celle de la tour en effectuant une simple règle de trois. Bien sûr, on peut aussi procéder de façon plus basique en montant les escaliers de la tour et en marquant tout le long du mur la hauteur du baromètre. Ensuite il suffit de compter les traits et de multiplier par la taille de l'engin. Plus sophistiqué: je propose d'attacher le baromètre à une corde et de le balancer comme un pendule avec son point le plus bas à hauteur du sol. On déduit la hauteur grâce à l'amplitude du balancement et la période d'oscillation. Plus subtil encore: on utilise toujours le baromètre comme pendule mais avec une corde beaucoup plus courte. Grâce à cela, on détermine le niveau des forces gravitationnelles au sommet de la tour et au niveau du sol. Ensuite, on applique la loi d'attraction universelle de Newton qui tient compte de l'éloignement du centre de la terre." Le répertoire de possibilités semblait inépuisable au grand désespoir du professeur qui, à aucun moment, n'entendit parler de pression atmosphérique. "Le plus simple à mon avis consiste à aller frapper chez le concierge et à lui dire: "J'ai pour vous un superbe baromètre si vous me dites combien mesure votre tour." conclut Niels Bohr. Il reçut finalement la note maximale et, au moment de quitter la classe, le professeur s'enquit tout de même de savoir si son élève connaissait la réponse qu'il avait mis tant d'ingéniosité à contourner. Niels Bohr admit que c'était le cas mais qu'il en avait marre du collège et des professeurs qui se targuaient de vouloir lui imposer leur façon de réfléchir. Cette histoire en dit long sur la personnalité du jeune homme qui, quelques années plus tard, révolutionna nos connaissances par une représentation de l'atome qui permettait enfin d'expliquer les phénomènes d'excitation des électrons et les fréquences des raies spectrales.



Niels Bohr
(1885-1962)

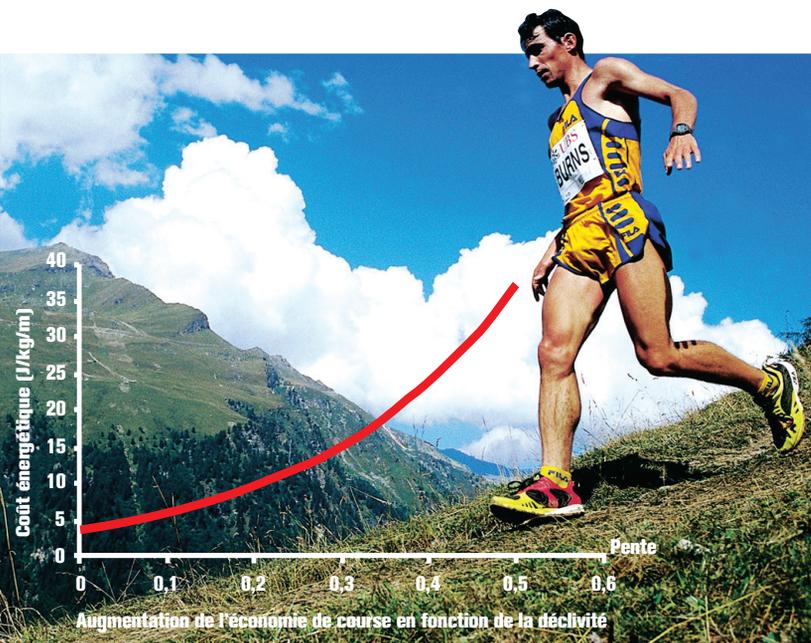
Ses théories lui valurent de recevoir le Prix Nobel en 1922 et d'être considéré aujourd'hui encore comme le père de la physique atomique. Cette carrière est connue de tous les scientifiques. En revanche, on ignore souvent que Niels Bohr, décidément dépositaire de multiples talents, aurait pu prétendre à une tout autre notoriété. Excellent gardien de but de football, il aurait pu faire carrière comme son frère Harald dans la redoutable équipe nationale de Suède qui obtint notamment la médaille d'argent aux Jeux olympiques de Londres en 1908. Seul petit problème: il répugnait à se jeter dans les pieds des assaillants adverses, ce qui lui valait d'être plus souvent relégué sur le banc des remplaçants. On raconte aussi que Niels Bohr pouvait se montrer suprêmement subtil dans certaines situations et totalement idiot en d'autres circonstances. Par exemple, il adorait les westerns mais, d'après son collègue physicien George Gamow, il était incapable d'en saisir l'intrigue. Dix fois durant la projection, il posait des questions stupides et il fallait lui préciser lesquels étaient les bons et lesquels étaient les méchants. Pauvre en dramaturgie, il faisait preuve en revanche d'une prodigieuse mémoire et utilisait le souvenir de certaines scènes pour alimenter les réflexions de son esprit bouillonnant. Les westerns l'ont ainsi aidé à construire une théorie qui veut par exemple que l'on agisse toujours plus rapidement en situation de défense instinctive que lorsqu'on procède en élaborant des stratégies.

Référence:
A la recherche de l'infini, Ed CERN/Flammarion 1996

>> L'ESCALATOR QUI TUE

En 2002, Minetti et ses collègues ont mesuré de façon systématique la dépense énergétique en course à pied en fonction de la pente. Pour cela, ils ont utilisé la méthode classique des sacs de Douglas. On retranche la teneur en oxygène du sac à celle de l'air ambiant. Simple, non ?

Notez que cette relation entre coût énergétique et pente a été établie sur un tapis roulant c'est-à-dire sur un sol parfaitement lisse et parfaitement adhérent, donc sensiblement différent du terrain naturel. Quoi qu'il en soit, les dépenses d'énergie mesurées dans ces conditions semblent similaires à celles relevées sur le terrain avec des appareils embarqués.



déclivité qui permet d'avaler un maximum de dénivelé en un minimum de distance. Si vous êtes en montagne, nous vous encourageons à attaquer tout droit dans les alpages. Sinon, vous pouvez aussi vous tester sur des pentes plus faibles de l'ordre de 5 à 10%. Evidemment, l'effort qu'implique une ascension sur 1000 mètres de dénivelé n'est pas tout à fait le même si l'on emprunte le chemin des vaches ou celui des chamois (voir ci-dessus). Nous nous référons pour cela à l'étude d'Alberto Minetti. Dans la grande tradition de l'école de physiologie de l'exercice et de biomécanique italienne, cet auteur avait décrit de façon extensive l'évolution de l'économie de déplacement en fonction de la pente (2). Grâce à l'incorporation de son équation dans notre logiciel, nous pourrions utiliser n'importe quel parcours ascendant pour déterminer nos aptitudes énergétiques pourvu seulement qu'il présente une déclivité à peu près constante.

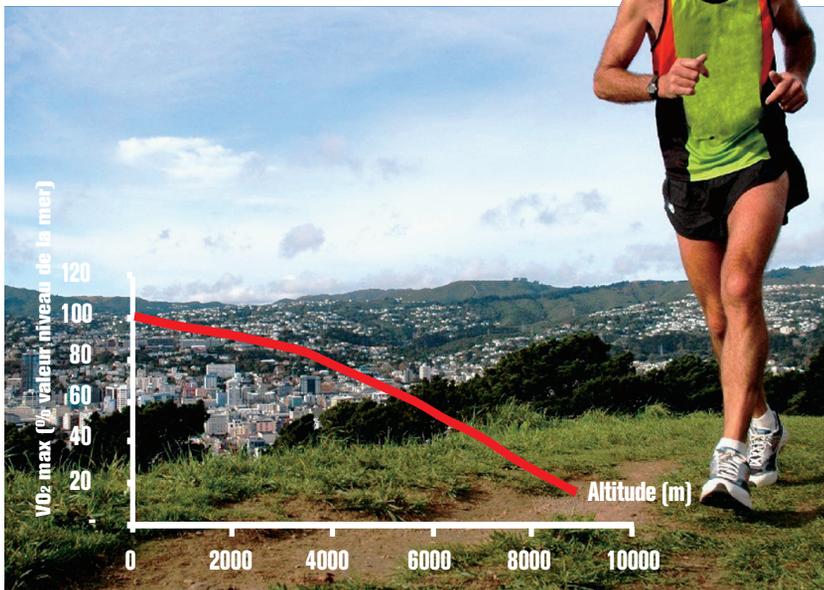
Il faut que tu respires

Un autre paramètre mérite d'être pris en considération lorsqu'on se met en tête de galoper dans la montagne. Il s'agit évidemment de cette loi naturelle qui veut que l'oxygène se raréfie en altitude; un phénomène archi-connu qui découle précisément de la réduction du poids de la colonne d'air à mesure que l'on se rapproche du sommet de l'atmosphère. Bien sûr, nos capacités d'oxygénation des muscles en pâtissent. Si vous prévoyez de gravir l'Everest lors de vos prochaines vacances, retenez que la pauvreté de l'air en O_2 réduit de façon drastique les gradients de pression entre les poumons et les mitochondries de la cellule musculaire.

Simple problème de plomberie: en altitude, l'oxygène est poussé jusqu'aux muscles avec moins de force par rapport à ce qui se passe au niveau de la mer. Examinons cela plus en détail. Dans un premier temps, la baisse de la pression partielle en oxygène entraîne le déclenchement d'un processus compensatoire: la ventilation s'accroît. La chose devient particulièrement sensible lorsqu'on se prête à un petit effort, comme celui de monter les escaliers. On se sent anormalement essoufflé. Et l'emballement des mécanismes respiratoires ne suffit pas à saturer complètement l'hémoglobine en oxygène. Il s'ensuit une diminution de la capacité du sang à transporter ce gaz vital, ce qui entraîne la mise en place d'un autre mécanisme adaptatif, c'est-à-dire l'augmentation du nombre de globules rouges. Seulement là, il faut être patient et ne pas s'attendre à des miracles! Les chiffres recueillis dans le cadre d'expériences rigoureuses sont loin de conforter ceux qui alimentent les contes de fée pour sportifs. La polyglobulie d'altitude reste très modérée et l'illusion d'une augmentation massive résulte en réalité d'une mauvaise interprétation des mesures. En effet, on utilise classiquement l'hématocrite (*) pour se faire une idée des transformations en cours. Or, l'altitude a aussi pour effet de provoquer une fuite de plasma et donc une augmentation de la concentration qui ne reflète pas forcément une surproduction globulaire. C'est clair? Pour faire encore plus simple, disons que l'élévation de l'hématocrite en stage dit d'oxygénation, c'est un peu comme la perte de poids à la sortie du sauna. Elle dépend surtout de la flotte qui entre et qui sort de l'organisme. Et si l'altitude

entraîne effectivement une mise en branle de la production de globules rouges, celle-ci n'atteint jamais les chiffres extravagants qui circulent encore au sein de la communauté sportive. Profitons-en au passage pour mentionner une application pratique afin de bénéficier des effets positifs de l'entraînement en altitude sur la performance en plaine. Si l'on perd beaucoup de plasma en altitude, on bénéficie en redescendant d'un phénomène immédiat de surcompensation qui se traduit par une large expansion du volume plasmatique. Or, lorsque le volume sanguin augmente, le remplissage cardiaque pendant la diastole s'amplifie. Ensuite, c'est la loi de Starling qui joue: plus y en a qui rentre, plus y en a qui ressort. C'est une histoire de stockage d'énergie élastique dans les parois du myocarde lors du remplissage, suivi immédiatement d'une restitution pendant la contraction. L'éjection et donc le débit cardiaque sont améliorés. Par voie de conséquence, le bénéfice se répercute sur la consommation maximale d'oxygène puisque cette dernière dépend du débit cardiaque et de la différence artério-veineuse en O_2 . Pour s'en convaincre, il suffit d'avoir à l'esprit l'optimisation des performances suite à une perfusion de plasma. C'est un peu moins efficace que les manœuvres d'auto-transfusion mais néanmoins redoutable car des gains de l'ordre de 4% ont été observés chez des skieurs de fond de haut niveau. Restent les considérations d'ordre éthique que l'on se doit d'évoquer car la manœuvre représente une voie artificielle

(*) L'hématocrite représente le rapport entre le volume des globules rouges dans un échantillon de sang (globules rouges + plasma). Sa valeur dépend donc aussi de la quantité de plasma.



>> ILS VOIENT DES YÉTIS PARTOUT

Il y a une quinzaine d'années, Péronnet décrivait de façon systématique la réduction de la consommation maximale d'oxygène en fonction de l'altitude. A 1500 mètres, on rigole encore. A 3000 mètres, on commence sérieusement à manquer d'air. A 8000 mètres, c'est le délire! L'oxygène n'arrive plus en quantité suffisante pour alimenter à la fois le cerveau et les muscles à l'exercice. Les himalayistes rapportent invariablement qu'à ces altitudes, aucune réflexion vraiment cohérente n'est possible pendant l'effort. Dans ces conditions, il ne faut plus trop s'étonner s'ils voient des yétis partout!

d'augmentation de la performance. Plus naturellement, on peut utiliser la surcompensation du volume plasmatique pour placer un stage d'altitude un ou deux jours avant le jour J. Au-delà de ce délai, la fatigue engendrée par l'altitude n'est plus contrebalancée par le mécanisme en question. Une deuxième période favorable à la performance est observée entre 7 et 14 jours car à ce moment là, les effets négatifs de l'altitude ont presque totalement disparu et on bénéficie alors des adaptations positives qui, elles, se résorbent plus lentement que la fatigue.

Everest chez toi

Maintenant reprenons le cheminement de l'oxygène dans l'organisme et la façon dont celui-ci est perturbé par l'hypoxie. On s'aperçoit alors que la perfusion des muscles actifs est dépréciée en altitude en raison de la compétition qui s'instaure avec les territoires centraux - cœur, cerveau et viscères - que l'on désigne parfois par l'expression "*organes nobles*" (si tant est que l'on puisse affirmer qu'il existe des organes plus nobles que d'autres). Il faut savoir que les vaisseaux sanguins sont dotés de muscles qui leur permettent de faire varier leur diamètre et donc d'orienter le débit selon les besoins. Lorsqu'on fait face à des difficultés d'approvisionnement, tout se passe comme si l'on décidait de sacrifier les territoires périphériques au profit des organes vitaux. Voilà qui explique la diminution des apports d'oxygène au sein de la mitochondrie à l'origine de cette souffrance musculaire caractéristique de l'exercice en altitude. Qui n'a jamais eu mal aux pattes en montagne alors que l'in-

tensité de l'effort est ridiculement faible par rapport à celle habituellement maintenue en plaine? Heureusement, on peut compter là encore sur une série d'adaptations naturelles. A la longue, on observe en effet une augmentation de la densité des capillaires sanguins. Le nombre de mitochondries lui-même se trouve revu à la hausse, notamment à la périphérie des fibres musculaires et donc à proximité des capillaires sanguins. On assiste également à un phénomène de fonte musculaire, ce qui, paradoxalement, contribue à améliorer l'oxygénation des fibres. En effet, la diminution du diamètre des fibres raccourcit nécessairement la distance moyenne entre les capillaires et les mitochondries, facilitant ainsi la diffusion de l'oxygène jusqu'à son site d'utilisation. Tous ces efforts sont méritoires. Mais cela ne suffit pas pour rétablir l'équilibre. Voilà pourquoi on observe une chute de la VO₂ max en fonction de l'altitude (voir schéma ci-dessus). Celle-ci n'est guère sensible en dessous de 1500 mètres. Ensuite, la diminution se poursuit à raison d'un pour cent par tranche de 100 mètres supplémentaire (3). Si bien qu'à 2000 mètres, la réduction de VO₂ max est d'environ 5%. Elle sera de 15% à 3000 mètres. A 8000 mètres, la VO₂ max ne vaut guère plus de 30% de sa valeur habituelle. Cela signifie qu'un jeune citadin de 20 ans en pleine santé qui possède typiquement une VO₂ max de 45 ml/min/kg ne disposera sur les 800 derniers mètres de l'ascension de l'Everest que d'une puissance correspondant à moins de 13 ml/min/kg, c'est-à-dire juste assez d'énergie pour se tenir debout mais certainement pas assez pour avancer. Pas même à quatre pattes! On comprend alors que, pour tenter ce genre

d'ascension, il faut disposer d'une VO₂ max et d'une endurance très élevées, sauf évidemment si l'on se déplace à dos de sherpa ou le nez vissé dans un masque à oxygène. Mais quel intérêt? A ce compte-là, on peut aussi se faire carrément déposer au sommet en hélicoptère. Grimper avec des bonbonnes, c'est un peu comme découvrir le désert à travers le pare-brise teinté de son 4x4 climatisé. Autant rester chez soi!

L'avantage de courir raide

Dans notre petit logiciel, nous avons inclus l'équation qui rend modeste face à la montagne, celle qui fait le lien entre VO₂ max et altitude. Il faudra donc vous renseigner sur l'altitude maximale du lieu de vos performances et introduire cette donnée dans notre feuille de calcul. Si l'on procède avec soin, la méthode s'avère extrêmement précise et même plus fiable que celle qui impliquait des performances sur terrain plat. Dans les côtes, nous sommes à peu près tous égaux en termes d'économie de déplacement. Il n'y a plus vraiment de "*bon*" ou de "*mauvais*" coureur. L'essentiel du travail consiste effectivement à élever sa propre masse contre les forces de pesanteur et, bien sûr, les données sont les mêmes pour tout le monde. Ainsi, on peut estimer que chaque mètre de dénivellation représente une dépense énergétique identique de l'ordre de 10 joules par kilogramme de masse corporelle. Le coût réel pour l'organisme avoisine alors les 40 joules car le rendement de la locomotion pour des pentes supérieures à 15% rejoint celui du muscle isolé autour d'une valeur de 25%.

Cela signifie qu'un quart de l'énergie produite au sein du muscle est effectivement transformée en mouvement et qu'il faut quadrupler le travail mécanique fourni pour avoir une idée de l'énergie totale consommée à partir des sucres et des graisses. En l'occurrence, dix joules produites = 40 joules consommées. Que deviennent les 30 joules restantes? Elles sont dissipées sous forme de chaleur. Ainsi, les muscles n'échappent pas à la loi générale de la thermodynamique qui veut que toute transformation d'un type d'énergie en un autre est nécessairement accompagnée par une production d'énergie thermique. Ce rendement de 25% nous pénalise évidemment lorsqu'il s'agit de montrer sa force. En même temps, on doit avoir conscience que ce n'est pas un mauvais résultat, surtout lorsqu'on le compare avec celui du moteur à explosion de nos voitures, motos et autres engins pétaradants dont l'efficacité ne dépasse guère les 15%. Seul le moteur

électrique fait mieux avec une efficacité de conversion de l'ordre de 90%. Mais si on intègre dans le calcul l'ensemble de l'économie du système en tenant compte notamment des pertes énormes au moment de la production et du transport de l'électricité, celui-ci s'avère nettement moins intéressant. Bref, nos muscles constituent de remarquables machines de conversion d'énergie, capables de produire à relativement faible coût toutes sortes de mouvements, même les plus complexes, qui de surcroît peuvent être effectués à différentes vitesses. Bien sûr, il existe un registre optimal de fonctionnement. Mais, lorsqu'on s'en éloigne, cela marche encore assez correctement. On peut appliquer ce raisonnement à la course en côte. On verra alors que 25% de pentes constituent la déclivité optimale pour gravir le plus grand dénivelé en un temps donné. Si le chemin est moins raide, on dépensera plus d'énergie au total pour atteindre le sommet. C'est la raison pour

laquelle nous avons intégré dans notre petit logiciel l'équation d'Alberto Minetti présentée plus haut. De toute façon, la faible variabilité de l'économie de déplacement d'un coureur à l'autre en côte permet d'évaluer leurs aptitudes énergétiques avec une plus grande précision que si l'on considère les performances sur terrain plat. C'est également plus facile à mettre en œuvre. Pourquoi? Parce qu'on arrive plus facilement à mobiliser l'ensemble de ses ressources énergétiques. Lors d'une ascension, il est possible en effet de recruter une masse musculaire plus importante et d'éviter ainsi une limitation locale de l'effort comme elle apparaît fréquemment chez les coureurs néophytes sur le plat. Le recours éventuel

>> LES ÉCONOMISTES NOUS FONT MARCHER

L'économie de déplacement de la marche varie avec la vitesse alors que celle de la course ne bouge quasiment pas, du moins tant que l'on se cantonne à des vitesses sous maximales. Qu'est-ce que cela signifie? C'est simple. Plus on court vite, plus on dépense d'énergie. Mais comme on parcourt plus de kilomètres dans le même temps, cela ne change rien à la dépense énergétique par kilomètre parcouru. En clair, cela signifie que celui qui boucle son marathon en deux heures et quart ne dépense ni plus ni moins de calories que celui qui met une ou deux heures de plus. Pour la marche, c'est différent. Il existe une vitesse optimale de déplacement autour de 4km/h. Le coût énergétique augmente à mesure que l'on s'éloigne de cette valeur de référence: soit que l'on marche trop vite, soit que l'on marche trop lentement. Sur terrain plat, on sait aussi que la course coûte à peu près deux fois plus d'énergie que la marche. Lorsqu'on veut parcourir de longues distances, la marche s'impose donc comme le moyen le plus rentable. En montée, la différence entre ces deux modes de locomotion s'atténue progressivement et, au-delà d'une pente de 20%, ils deviennent à peu près équivalents. Évidemment, il faut être capable de galoper sur des chemins aussi raides. Ce n'est pas à la portée de n'importe qui. Et en descente? Le même phénomène se produit avec des économies de déplacement qui se rapprochent progressivement l'une

de l'autre. Voilà pourquoi les randonneurs se mettent parfois à sautiller spontanément lors du retour au bercail. Signalons encore qu'une pente de 20% est idéale pour perdre rapidement de l'altitude. Au-delà, elle réclame trop d'énergie pour contrôler sa vitesse. Enfin, si la masse corporelle est déjà prise en considération au travers du coût énergétique exprimé par kilogramme, il faut néanmoins tenir compte de sa répartition sur les segments corporels. Chaque dizaine de grammes supplémentaire au niveau des pieds augmente beaucoup le travail nécessaire pour ramener la jambe libre à chaque enjambée. Même chose pour les bras lors de leurs oscillations. Le "travail interne" désigne précisément cette quantité d'énergie, celle nécessaire pour mouvoir les segments corporels autour du centre de masse. Le travail mécanique total étant la somme du travail interne et du travail externe (énergie nécessaire pour mouvoir le centre de masse lui-même). À titre d'exemple, sachez qu'un kilo supplémentaire au niveau des pieds augmente le coût énergétique de la marche de 7%, ce qui entraîne une diminution de performance de 6,5%. Or, cette différence de poids équivaut à peu près à l'écart qui existe entre l'équipement de ski de randonnée classique (skis et chaussures) par rapport à l'équipement de compétition de ski-alpinisme. Sur une épreuve typique comportant 4 heures de montée, cela



Chaque gramme compte!

représente une différence de 33 minutes au sommet: juste le temps d'avaloir un saucisson et de descendre une bouteille de Chianti. Avec cet exemple, on se rend compte que le poids est vraiment l'ennemi du coureur des cimes, *a fortiori* s'il est localisé au niveau des pieds ou des membres inférieurs. En course à pied l'influence de la masse aux extrémités est encore plus terrible sur la performance, tout simplement parce que les accélérations du membre oscillant qui revient vers l'avant sont plus vigoureuses. Le travail interne s'accroît encore plus. Essayez de courir avec des brodequins d'un kilo ou avec des raquettes couvertes de neige mouillée et vous verrez! L'idéal serait de courir pieds nus mais évidemment la nature du sol en terrain naturel n'autorise pas ce type de fantaisie. Il est nécessaire de trouver un compromis entre chaussure légère pour minimiser le travail interne et chaussures relativement lourdes pour attaquer sans appréhension dans les descentes.

ENTRAÎNEMENT

aux bâtons de ski sur des chemins escarpés permet d'optimiser encore la répartition du travail musculaire entre bras et jambes, ce qui retarde d'autant l'épuisement. Petit détail qui revêt une grande importance: dans ce genre d'exercice, il est nécessaire d'avoir des pointes de bâton extrêmement acérées et solides. Seules les extrémités en tungstène offrent cette qualité. Vérifiez cela avec votre marchand. Dans les courses de côte enfin, on se retrouve rapidement et naturellement à fond sans fournir d'effort mental important, contrairement à ce qui se passe sur terrain plat. Comme par hasard, c'est en côte que l'on se tire plus volontiers de bonne bourre avec les copains. Le plus compliqué est même d'éviter ce type de rivalité puérile dès que la route s'élève. Vous êtes convaincu? Fort bien. Voyons à présent comment fonctionne ce petit logiciel qui permet de déterminer primo, la puissance nécessairement consommée pour se déplacer en côte et secundo, les aptitudes énergétiques qui sous-tendent cette puissance grâce tout simplement à une série de performances en côte. Par rapport à la version dédiée à la course sur le plat, nous avons simplement introduit de nouveaux éléments pour tenir compte de la pente et de l'hypoxie. Bien sûr, la question reste posée en ce qui concerne

les ascensions qui comportent des portions planes voire descendantes. Dans ce cas-là, il convient tout simplement de retrancher le temps correspondant à ces sections. On a vu aussi qu'en deçà de 15% de déclivité, le rendement musculaire n'est pas constant ce qui impose une connaissance précise de la pente pour une bonne estimation de la dépense d'énergie. Ce paramètre dépend à la fois du dénivelé et de la distance parcourue. Or, si la différence d'altitude pose peu de problèmes (voir plus haut), la distance se révèle plus délicate à déterminer dans la mesure où l'on emprunte des chemins tortueux. Une mesure directe avec un GPS ou une roue de géomètre représente l'idéal. Sinon, on se rabattra sur l'usage d'un VTT équipé d'un simple compteur. Enfin, il faut tenir compte de la nature du sol et veiller à ce qu'il n'altère pas de façon significative le coût énergétique de la foulée. On perd beaucoup d'énergie en progressant sur un revêtement glissant, meuble ou caillouteux. En laboratoire, les meilleures performances en côte sont obtenues avec des déclivités importantes de l'ordre de 25% comme nous l'avons déjà mentionné. Mais ces mesures sont réalisées sur tapis roulant. Dans la réalité, les pentes optimales seront certainement un peu moins fortes en raison précisément des diffi-

cultés liées à l'adhérence et à l'irrégularité des surfaces. Là encore, l'utilisation de bâtons de ski de fond se révèle extrêmement précieuse car en plus d'apporter le secours de masses musculaires supplémentaires, la solidité des appuis au sol est renforcée et une pente de 25% en terrain naturel ne devrait alors plus faire peur.

Un déclin qui dit tout

Quelques bémols doivent néanmoins être apportés à la fiabilité du modèle. Par exemple, on ne tient pas compte des susceptibilités individuelles dans la réduction de la consommation maximale d'oxygène au fur et à mesure que l'on prend de l'altitude. Nous avons dit que la diminution moyenne de VO_2 max avoisinait un pourcent par tranche de 100 mètres gagnée au-dessus de 1500 mètres. Seulement, tous les sujets ne réagissent pas exactement de la même manière. On remarque curieusement que ce sont les athlètes les mieux entraînés qui accusent le plus fort recul de VO_2 max. Cette constatation paradoxale s'explique par un phénomène de désaturation artérielle qui se produit déjà chez eux lorsqu'ils produisent un effort maximal au niveau de la mer. Lors de l'exercice intense, le sang circule à toute vitesse dans les capillaires pulmonaires et n'a matériellement pas le

Données personnelles

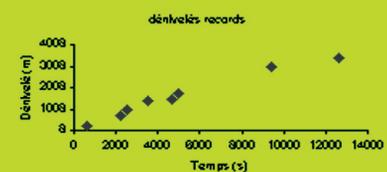
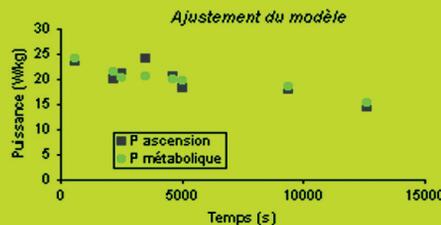
Lieu	temps (s)	Altitude Initiale (m)	Altitude finale (m)	Pente (%)	Distance (m)	Dénivelé (m)
Mt Ainslie	620			0,107	2 200	235
Mt Tennant	2 198			0,106	6 600	700
Cervinia	2 544	1 700		0,286	3 500	1 000
Mt Washington	3 500			0,116	12 200	1 417
Japan 1	4 633			0,099	15 000	1 480
Dolomites	5 004			0,170	10 000	1 702
Japan 2	9 383			0,143	21 000	3 000
Mt Cameroun	12 600	695	4 095	0,189	18 000	3 400

Pascension (W/kg)	VO_2 (ml/min/kg)
23,4	67,3
20,0	57,3
21,1	60,6
24,1	69,2
20,7	59,4
18,2	52,3
17,9	51,5
14,5	41,6

module calcul altitude		
Altitude	***	m
P barométrique	335	mbar
Pb mesurée	800	mbar

Résultats

	personnels	de l'élite
MAP (W/kg)	25,0	29,1
VO_2 max (ml/min/kg)	72	83,5
A (J/kg)	800	1 657
A (ml/kg)	38	80
E (W/kg/s)	-2,1	-1,5
E (%)	-8,2	-5,2
Erreur	20,2	
Erreur moyenne	2,8%	



Mode d'emploi

- 1/ Rentez vos données personnelles dans le cadre prévu à cet effet. N'oubliez pas d'effacer les records affichés pour l'exemple avant de passer à l'étape suivante.
- 2/ Appliquez le modèle de Péronnet et Thibault (1989) pour déterminer vos aptitudes énergétiques en exécutant le solveur dans le menu "outils" et en appuyant sur résoudre sans modifier la cellule cible (erreur_) ni les paramètres variables (A, VO_2 max et E, les valeurs en bleu). Si le solveur n'est pas installé, il faut le faire en allant dans "macro complémentaire" toujours dans le menu "outils". Examinez vos 3 aptitudes énergétiques fondamentales et comparez les aux valeurs de l'élite mondiale en athlétisme. Sur le graph les points bleus clairs représentent la puissance nécessairement développée pour couvrir un tel dénivelé (Minetti et al., 2002) et ceux bleus foncés représentent la puissance soutenue par le métabolisme aérobie et anaérobie estimées grâce au modèle de Péronnet. MAP représente la puissance maximale aérobie exprimée en W par kg de masse corporelle, VO_2 max est la consommation maximale en oxygène, A désigne la capacité anaérobie, E est un index d'endurance en rapport avec le % de VO_2 max maintenu sur longues distances.
- 3/ Orientez votre entraînement futur en fonction de vos aptitudes personnelles. Pour développer spécifiquement une aptitude énergétique, référez-vous aux exercices spécifiques par exemple ceux présentés dans le tableau 1 de notre premier article sur la détermination des aptitudes énergétiques. Inchiez dans votre programme les séances alors recommandées et changez vos baskets!
- 4/ Si vous utilisez un baromètre pour mesurer le dénivelé parcouru, vous pouvez calculer l'altitude finale et celle initiale en utilisant le petit module prévu à cet effet. Rentez la pression barométrique max mesurée, lancer l'outil "valeur cible" dans le menu outils. La cellule à modifier est la valeur de la pression barométrique qui va être calculée, rentrez directement la valeur à atteindre (celle de la pression barométrique mesurée) et la cellule à modifier est 'N4' (altitude) puis cliquer sur ok. Procédez de même pour l'altitude initiale afin d'obtenir la différence d'altitude (le dénivelé).

Dans ce schéma, les performances de l'élite des coureurs de cimes ont été analysées sur la base des records d'ascension répertoriés par Alberto Minetti.



Le niveau athlétique moyen est légèrement moins élevé en montagne que sur piste. Pour preuves : le Néo-zélandais Jonathan Wyatt, quadruple champion du monde de la discipline, n'avait atteint "que" la demi-finale sur 5000 mètres aux Jeux d'Atlanta en 1996.

temps de s'enrichir en oxygène. En altitude, le problème ne fait qu'empirer. Il semble même que l'on puisse prédire la marge de progression d'un athlète par l'ampleur de la réduction de VO_2 max en altitude. Si elle est très forte, la personne se trouve probablement proche du maximum de ses capacités adaptatives. Si elle est faible, on peut raisonnablement tabler sur des larges possibilités d'adaptation du système cardiovasculaire grâce à l'entraînement. Retenons seulement que chez l'athlète très entraîné, l'évaluation des aptitudes énergétiques à partir de performances effectuées en altitude sera très légèrement sous-estimée. Autre limite à l'entreprise: l'équation proposée par Alberto Minetti prévoit les variations de la dépense énergétique en fonction de la pente. Mais elle ne prend pas en considération la fatigue musculaire qui s'installe nécessairement lorsqu'on conduit l'exercice jusqu'à l'épuisement. Pourtant, on n'échappera pas à une augmentation lente et inexorable du coût énergétique au cours de l'effort. Celui-ci peut atteindre les 10%. Cela dépend essentiellement de l'intensité de l'exercice. Quoi qu'il en soit ce phénomène est aussi négligé dans le modèle de Péronnet utilisé dans notre feuille de calcul. Donc, au total, la source de sous-estimation des aptitudes énergétiques est annulée. Pourquoi faire compliqué quand on peut faire simple? Un modèle du type de celui que nous proposons doit être le plus simple possible et n'intégrer que l'essentiel. Il n'est pas certain que l'augmentation lente du coût énergétique avec la fatigue mérite d'y figurer. Enfin, nous avons supposé que l'athlète effectue son ascension en

courant. En pratique, il sera peut-être contraint de marcher sur quelques portions particulièrement raides. Or, on sait que sur le plat, le coût énergétique de la marche est inférieur à celui de la course (voir encadré). Heureusement, cela ne joue que modestement en montée: la différence d'économie entre la marche et la course s'estompe avec la pente.

L'Everest en huit heures

Compte tenu de ces différentes sources d'erreur, nous nous sommes demandé quelle était la précision de l'évaluation des aptitudes énergétiques. Pour répondre à cette question, nous avons appliqué la méthode aux records d'ascension répertoriés par Alberto Minetti (Voir ci-contre). Il s'avère que l'ensemble de ces performances peut être expliqué par une VO_2 max (72 ml/min/kg) et une endurance (-2,1 W/kg/s) cohérentes par rapport aux valeurs de l'élite mondiale en athlétisme (83 ml/min/kg et -1,5 W/kg/s). Il nous paraît assez normal effectivement que les coureurs de montagne affichent des aptitudes aérobies légèrement inférieures à celles des recordmen du monde en athlétisme et cela pour plusieurs raisons. Le vivier d'athlètes à travers la planète est très nettement supérieur à celui des coureurs de cimes. Il existe donc statistiquement plus de chances qu'un individu aux aptitudes exceptionnelles émerge en athlétisme plutôt qu'en course de montagne. De surcroît, le volume et surtout la qualité des entraînements pour l'élite en athlétisme sont supérieurs. Enfin, malheureusement, le recours à des adjuvants illicites est probablement plus fréquent chez les recordmen du monde en

athlétisme en raison des sommes d'argent mises en jeu, que pour les modestes coureurs des cimes. Parce que notre méthode tient compte de l'altitude, nous l'avons aussi appliquée au record du monde de l'ascension de l'Everest détenu par le Sherpa Pemba Dorji dans le temps de 8 heures et 10 minutes (4). Voilà qui suppose un degré de résistance particulier à l'altitude ainsi qu'une VO_2 max très élevée. Afin de préciser cette affirmation, nous avons appliqué notre petit logiciel en remplaçant toutefois l'équation de Minetti établie pour la course par celle de la marche. Comme on pouvait s'en douter, ce sherpa natif de ces hautes contrées et hyper entraîné en forte altitude a développé des adaptations extraordinaires. L'équation de Péronnet prévoit en effet une réduction des possibilités du métabolisme aérobie de l'ordre de 70% en moyenne sur l'ensemble de l'ascension de l'Everest alors que la réduction qui correspond à la performance de Pemba Dorji se limite à 45% seulement. Et ce n'est pas le dernier motif de surprise: sa consommation maximale en oxygène et son endurance sont similaires à celles de l'élite mondiale en athlétisme. Au total, les puissances prédites à partir des aptitudes énergétiques sont étonnamment proches de celles nécessairement développées pour parcourir un tel dénivelé dans les records d'ascension. L'erreur est même inférieure à 3%. Tout tourne rond et cela présente deux implications. Premièrement, notre petit logiciel ne semble pas mauvais pour évaluer des aptitudes énergétiques. La deuxième implication concerne nos connaissances sur l'énergie humaine dont il s'avère qu'elles sont conformes à la réalité. Un modèle ou une équation ne révèle toute sa beauté que lorsqu'il, ou elle, a résisté au test de confrontation avec la réalité. C'est le cas ici. Gloire alors au modèle de Péronnet et Thibault qui, 16 ans après sa formulation, continue de présenter un intérêt majeur pour rendre compte des performances humaines. Et maintenant, on arrête de bavarder et on court vers le sommet! **Robin Candau**

Bibliographie

- (1) Péronnet F, Thibault G. *Mathematical analysis of running performance and world running records.* *J Appl Physiol.* 1989 Jul; 67(1): 453-65.
- (2) Minetti AE, Moia C, Roi GS, Susta D, Ferretti G. *Energy cost of walking and running at extreme uphill and downhill slopes.* *J Appl Physiol.* 2002 Sep; 93(3): 1039-46.
- (3) Péronnet F, Thibault G, Cousineau DL. *A theoretical analysis of the effect of altitude on running performance.* *J Appl Physiol.* 1991 Jan; 70(1): 399-404.
- (4) www.cnn.com/2004/WORLD/asiapcf/05/21/everest.record/