



La physique de l'aviron

ROLAND LEHOUCQ • JEAN-MICHEL COURTY

Pour réduire le temps de parcours, il faut alléger le bateau et ramer aussi régulièrement que possible pour que la vitesse soit constante.

En août 2001, huit athlètes français sont devenus champions du monde d'aviron en catégorie «poids légers», après avoir ramé 2 000 mètres à la vitesse moyenne de 21,4 kilomètres par heure. Comment ont-ils fait? Les rameurs propulsent leur bateau en faisant levier sur l'eau à l'aide de leurs rames. Ceux qui pratiquent l'aviron s'assoient face à l'arrière de leur esquif et plongent leurs avirons dans l'eau le plus «souplement» possible avant d'appuyer. Afin de réduire le nombre d'immersions des avirons dans l'eau, les rameurs sont assis sur des chariots mobiles ; ils plongent les rames quand les jambes sont repliées, et sortent les rames de l'eau quand ils sont couchés vers l'arrière, jambes étendues. Cette combinaison de mouvements amplifie la course des avirons, de sorte que l'effet de levier dure plus longtemps.

Leur esquif lancé, l'objectif des rameurs est de contrebalancer, par un effort continu et régulier, l'usure naturelle du mouvement par les divers frottements liquides. À l'évidence, les causes de déperdition d'énergie sont nombreuses : chaque aviron frotte sur l'eau et les avirons cèdent une partie de leur quantité de mouvement au liquide, perdant ainsi une petite fraction de l'énergie développée par le rameur. Un rameur habile minimise cette perte en «s'appuyant» sur l'eau au maximum plutôt qu'en la mettant en mouvement. C'est pourquoi, quand les rameurs sont de bons techniciens, l'essentiel de la résistance à l'avancement du bateau provient du frottement de la coque sur l'eau et de la résistance de la vague, dite d'étrave, créée à l'avant du bateau.

Dans les conditions calmes habituelles des compétitions d'avirons, la force de frottement est égale au carré de la vitesse du bateau multiplié par la valeur de sa surface immergée et par un certain coefficient de structure. Comme son nom l'indique, ce «coefficient de structure» dépend de la texture et de la forme de la partie immergée de la coque ; le matériau ultralisse et la forme longue et effilée adoptés pour construire les bateaux de compétition abaissent ce coefficient et réduisent les vagues et les remous. Selon le principe d'Archimède, le volume immergé est égal à la masse du bateau divisée par la masse volumique de l'eau. Pour que le volume, et donc la surface immergée, et donc les frottements, soient aussi réduits que possible, les constructeurs allègent au maximum leurs esquifs : le poids d'un skif – un bateau à un seul rameur –, est d'à peine 20 kilogrammes, celui d'un bateau à huit rameurs n'excède guère 100 kilogrammes.

Pour que le bateau avance à une certaine vitesse, les rameurs doivent fournir une puissance constante égale à la puissance

développée par la force de frottement. Cette force étant proportionnelle au carré de la vitesse du bateau, la puissance de propulsion nécessaire (force multipliée par la vitesse) croît comme le cube de cette vitesse. Lorsque les rameurs redoublent d'efforts, ils n'accroissent la vitesse que de... 26 pour cent. Une comparaison entre les performances d'un rameur moyen et celles d'un champion illustre encore mieux le phénomène : seul sur son skif, un rameur en bonne santé atteint et maintient facilement environ 14 kilomètres par heure. Pendant toute la durée de l'effort, il dépense 250 watts. Toutefois, s'il souhaite devenir un champion, il lui faut presque doubler cette puissance. Il n'accroît alors sa vitesse que de... 3,6 kilomètres par heure. Lancé sur 2 000 mètres à une vitesse moyenne d'environ 17,6 kilomètres par heure, un champion de skif maintient cet effort considérable pendant sept minutes!

CONVERSION PUISSANCE/VITESSE

La faible conversion puissance/vitesse explique qu'un «huit» soit à peine plus rapide qu'un «skif». Comparons la performance des champions du monde français en bateau à huit à celle des champions de skif sur la même distance. Nos athlètes ont fourni une puissance de propulsion totale voisine de 4 000 watts, qui servait à emmener le poids du bateau plus celui du barreur et des rameurs. À peu près neuf fois plus lourde qu'un skif, leur embarcation était freinée en proportion de sa surface immergée, laquelle varie à peu près comme la puissance $2/3$ du volume immergé : celle d'un bateau à huit rameurs est donc quelque $4,33$ ($9^{2/3}$) fois plus grande que celle d'un skif. Ainsi, alors que les huit rameurs fournissent environ huit fois plus de puissance, leur poids et celui du barreur engendrent $4,33$ fois plus de frottements. Si l'on suppose que chaque équipier fournit la même puissance qu'un rameur de skif, la vitesse du bateau à huit est égale à celle du skif multipliée par la racine cubique du rapport $8/4,33$, ce qui représente un accroissement de seulement 23 pour cent. Nous déduisons de ce raisonnement que la vitesse d'un bateau de huit équipiers, tous capables de soutenir une vitesse de 17,6 kilomètres par heure en skif, est d'environ 21,6 kilomètres par heure, une valeur voisine des 21,4 kilomètres atteints par nos champions.

Pour utiliser l'énergie de son équipe de façon optimale, le barreur veille à ce que la vitesse du bateau soit aussi constante que possible pendant toute la course, les rameurs s'efforçant quant à eux de maintenir cette vitesse constante pendant chacun de leurs mouvements synchronisés.



Se pliant et se dépliant, le rameur allonge au maximum le mouvement de levier sur l'eau, par lequel il propulse son bateau.



Loin d'échanger un sourire contre une fleur, ce rameur échange sa quantité de mouvement contre celle de sa barque. Celle-ci recule pendant que sa belle avance vite, le laissant dans sa galère.

RÉGULARITÉ SOUHAITÉE

Examinons une situation concrète pour montrer l'effet bénéfique de la régularité sur les performances. Prenons le cas d'un bateau qui avance de un mètre par seconde quand la puissance de propulsion est de cinq watts. Puisqu'elle est proportionnelle au cube de la vitesse, la puissance de propulsion qu'il faudrait pour que ce même esquif avance de 3 mètres par seconde est de 5 fois 3^3 , soit 135 watts. Un rameur qui voudrait couvrir 600 mètres en 200 secondes devrait fournir cette puissance pendant cette durée, dépensant ainsi une énergie de 135×200 , soit 27 000 joules. Cependant, ce même rameur pourrait aussi choisir de progresser de deux mètres par seconde pendant la moitié du temps, puis de doubler la vitesse pendant le temps restant. Il lui faudrait donc développer 40 watts pendant la moitié du temps, puis passer à 320 watts, et dépenser au total une énergie de $40 \times 100 + 320 \times 100$, soit 36 000 joules. Cette valeur est supérieure de 33 pour cent à l'énergie de 27 000 joules correspondant à une vitesse de trois mètres par seconde!

Cet écart appréciable résulte de la relation de proportionnalité qui lie la puissance de propulsion non pas à la vitesse, mais au cube de cette vitesse. Il existe une «vitesse idéale», celle pour laquelle les athlètes parcourent en un temps minimal la distance de course tout en dépensant l'énergie maximale qu'ils peuvent fournir ; tout écart entre cette vitesse idéale et les vitesses instantanées «retarde le rameur». Si des considérations tactiques peuvent amener des concurrents à modifier leur vitesse pendant la course, la capacité à réguler la vitesse n'en reste pas moins le facteur déterminant de victoire!

Dans la pratique, une régularité parfaite de mouvement n'est guère possible : un rameur ne fournit pas un effort continu puisque ses avirons sont hors de l'eau la moitié du temps. Cependant, la séquence de mouvements utilisée par les spécialistes de l'aviron leur permet de maintenir quand même la vitesse à peu près constante. Comment font-ils? S'ils n'utilisaient que leurs bras, la vitesse de l'esquif décroîtrait pendant le «temps glisseur», durant lequel les rames sont hors de l'eau. Cependant, après le «temps moteur», pendant lequel l'athlète tire sur ses bras pour propulser le bateau et déplie son corps, le rameur sort les avirons de l'eau avant de ramasser ses jambes vers l'arrière tout en poussant ses bras et les avirons vers l'avant. En réaction, le bateau se déplace vers l'avant plus rapidement que le rameur puisque sa masse, égale à environ 20 kilogrammes pour un skif, est plus faible que celle du rameur, voisine de 80 kilogrammes. Ainsi, les très bons



Les ergomètres sont des machines à ramer qui imitent l'aviron : ils opposent aux efforts du rameur une puissance de freinage proportionnelle au cube de la vitesse de leur volant d'inertie.

rameurs savent comment «étaler» leurs mouvements de jambe de façon à maintenir quasi constante la vitesse de l'esquif pendant la phase de glissement. Ils utilisent ainsi la puissance qu'ils développent de façon optimale.

Si les athlètes de l'aviron travaillent sur l'eau pour améliorer leur technique, ils travaillent en salle leur puissance physique à l'aide d'une machine à ramer : un ergomètre. Avec ce dispositif à simuler les efforts faits sur l'eau, le sportif est assis sur un siège coulissant, et tire sur une chaîne dont la translation entraîne la rotation d'un volant d'inertie. Lorsque le rameur en salle replie les jambes pour se ramasser tout en poussant sur ses bras, un mécanisme de rappel enroule la chaîne tandis que le volant d'inertie tourne librement. Lorsqu'il se déplie pour tirer, des ailettes solidaires de la roue transforment le volant d'inertie en une sorte de ventilateur. Un clapet régule l'arrivée d'air et fait varier à volonté l'intensité de la force de frottement. Au final, la puissance que le sportif doit fournir au système est proportionnelle au cube de la vitesse de rotation du volant, qui simule ainsi celle d'un esquif sur l'eau.

Les appareils de salle ont l'avantage d'être plus faciles à instrumenter que les bateaux. Grâce à leurs calculateurs électroniques, les ergomètres informent les pratiquants de leurs performances. Pour cela, la simple mesure de vitesse instantanée de la roue suffit. Ainsi, lorsque le sportif revient en position ramassée, la vitesse de la roue décroît. Le calculateur détermine à partir de cette décroissance la puissance dissipée par les frottements, c'est-à-dire la puissance que développe le sportif. Les ergomètres estiment aussi une vitesse équivalente de bateau et une distance équivalente parcourue, ce qui permet au rameur en salle de retrouver – ou d'imaginer – les sensations acquises à l'extérieur. Toutefois, l'allure du «bateau équivalent» est inférieure à celle d'un bateau réel à bord duquel le rameur aurait fourni un effort égal. En salle, le rameur doit en effet accélérer son corps vers l'avant puis vers l'arrière, ce qui lui coûte une puissance d'environ 40 watts, indisponible pour la performance au compteur.

Roland LEHOUCQ est astrophysicien au Service d'astrophysique du CEA. **Jean-Michel COURT** est physicien, chargé de recherche au CNRS.

Décomposition du mouvement :
<http://www.triton.studver.uu.nl/tech/index.php3?way=scull&cur=8>
Fédération Française des Sociétés d'Aviron :
<http://avironfrance.asso.fr/accueil.htm>

Climatologie

La Terre chauffe-t-elle?

Gérard Lambert. EDP Sciences, Collection Bulles de sciences, 2001 (224 pages, 98 francs).

La Terre chauffe-t-elle? est un excellent ouvrage, concis et clair, et très bien documenté. Le lecteur y trouvera un exposé à la fois simple, très compréhensible et fort complet, sur le réchauffement climatique de notre planète. L'auteur indique dans son avertissement qu'un lecteur d'une quinzaine d'années pourra lire ce livre sans être noyé dans des notions scientifiques qui le dépasseraient. Bien qu'ayant moi-même dépassé cet âge, je pense que ce défi est effectivement surmonté avec beaucoup d'adresse et d'élégance!

L'auteur adopte le parti, bien agréable, de présenter les différents chapitres comme les étapes successives d'une enquête conduite par un conseiller scientifique, à la demande du président des États-Unis. Cette instruction est perturbée par les interventions intempestives d'un représentant de l'industrie charbonnière, puis elle bénéficie, si l'on peut dire, des conseils d'une écologiste issue d'une organisation non gouvernementale, qui mêle ses fils à ceux d'une histoire d'amour entre le conseiller scientifique et une belle glaciologue grenobloise... Que le lecteur se rassure, le fil de l'enquête n'en est pas perdu pour autant : «C'est à vous, mon conseiller scientifique, de me fournir les arguments et, d'abord, d'évaluer comme il faut toutes les thèses en présence. (...) Ce qu'il

me faudrait, c'est que vous repreniez vous-même l'ensemble de la question, en allant chercher les informations de base, à leur source même, et en critiquant au besoin leur signification».

Les différents chapitres se succèdent ainsi avec beaucoup de logique et de cohérence, chacun restant autosuffisant et d'une extrême clarté. Gérard Lambert nous présente la reconstitution de l'histoire de la Terre et des climats du passé, l'analyse du «chauffage» par les gaz à effet de serre, et les différents scénarios possibles du climat du futur réalisés grâce à la modélisation numérique. Il évoque aussi rapidement le contexte des négociations internationales (le sommet de Kyoto), et la problématique Nord-Sud au centre de ces débats : comment les pays pauvres peuvent-ils adopter les normes antipollution, très coûteuses à mettre en place? Il évoque en fin d'ouvrage, mais de façon un peu trop succincte, les conséquences du réchauffement climatique sur les activités socio-économiques.

Cet livre est remarquable, car toutes les notions de base nécessaires à la compréhension du réchauffement de la planète sont expliquées de façon imagée et très abordable : datation au carbone 14, perturbations de l'orbite terrestre et alternance des périodes glaciaires et interglaciaires, effet de serre naturel et effet de serre additionnel lié aux activités humaines, rôle climatique de l'océan.... Seule l'influence de la température sur le fractionnement isotopique de l'oxygène lors de la condensation nuageuse est mentionnée, sans autre explication qu'un renvoi aux travaux scientifiques correspondants, mais là, la tâche pédagogique était vraiment trop ardue! Toutes ces explications restent simples, néanmoins scientifiquement correctes. Deux petites inexactitudes seulement se sont glissées

dans l'ouvrage : le Centre Européen pour la Prévision Météorologique à Moyen Terme est installé à Reading, en Grande-Bretagne, (et non à Bracknell), et il centralise les données de l'ensemble de la planète (et pas seulement celles de l'Europe). Seule l'hypothèse que le réchauffement de la planète conduirait à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des cyclones tropicaux est contestable. L'auteur reprend l'idée, *a priori* naturelle, que l'augmentation de la température conduit à un élargissement de la zone géographique sur laquelle ces cyclones se développent, mais des travaux récents de modélisation climatique ne semblent pas confirmer ce raisonnement.

Ce livre se présente comme une vaste promenade à travers les laboratoires de la planète, où sont menées toutes les recherches sur le réchauffement du climat. Les laboratoires apparaissent sous leurs vrais noms et leurs localisations exactes, ce qui permet de donner corps de façon très vivante à l'histoire. Le lecteur un peu familier de ces questions s'amusera par ailleurs à lire ce livre comme un roman à clés, cherchant par exemple qui peut se cacher derrière le professeur belge Paul Béranget (amateur de vins français...) ou derrière Sir John Hoplington, qualifié de «typiquement britannique»... L'ouvrage de Gérard Lambert est certainement le plus agréable, le plus facile à lire et le plus exact qu'il est possible de trouver actuellement sur le réchauffement climatique de la planète. Nous ne pouvons que souhaiter qu'il soit lu par un public aussi large que possible.

Jean-Claude ANDRÉ,
Centre européen de recherche
et de formation avancée en calcul
scientifique, Toulouse.



W. Marr. Panoramic Images

Un constat : la Terre se réchauffe. À travers l'enquête fictive menée par un conseiller scientifique de la Maison Blanche, le livre, *La Terre chauffe-t-elle?*, présente avec clarté toutes les notions scien-

tifiques indispensables pour comprendre le phénomène (l'effet de serre, rôle climatique de l'océan, perturbations de l'orbite terrestre, etc.), ainsi que le contexte économique-politique.