

Performance en course à pied et forme des stades

Amandine Aftalion (amandine.aftalion@ehess.fr)

CAMS (Centre de mathématique et d'analyse sociales, UMR8557 CNRS et EHESS)
École des Hautes Études en Sciences Sociales, 54 Boulevard Raspail, 75006 Paris

La course à pied se décline en plusieurs distances que l'on pourra admirer lors des Jeux Olympiques de Paris, avec à la clé de possibles nouveaux records du monde. Et si les stratégies des champions pouvaient devenir accessibles à tous les coureurs ?

Grâce à un modèle qui repose sur un problème de contrôle de la force de propulsion (et donc de la vitesse) afin d'optimiser la dépense énergétique et le temps final, nous déterminons comment les coureurs doivent optimiser au mieux leur rythme afin de réaliser la meilleure performance et proposons d'améliorer la forme historique des stades.

En route vers le stade moderne

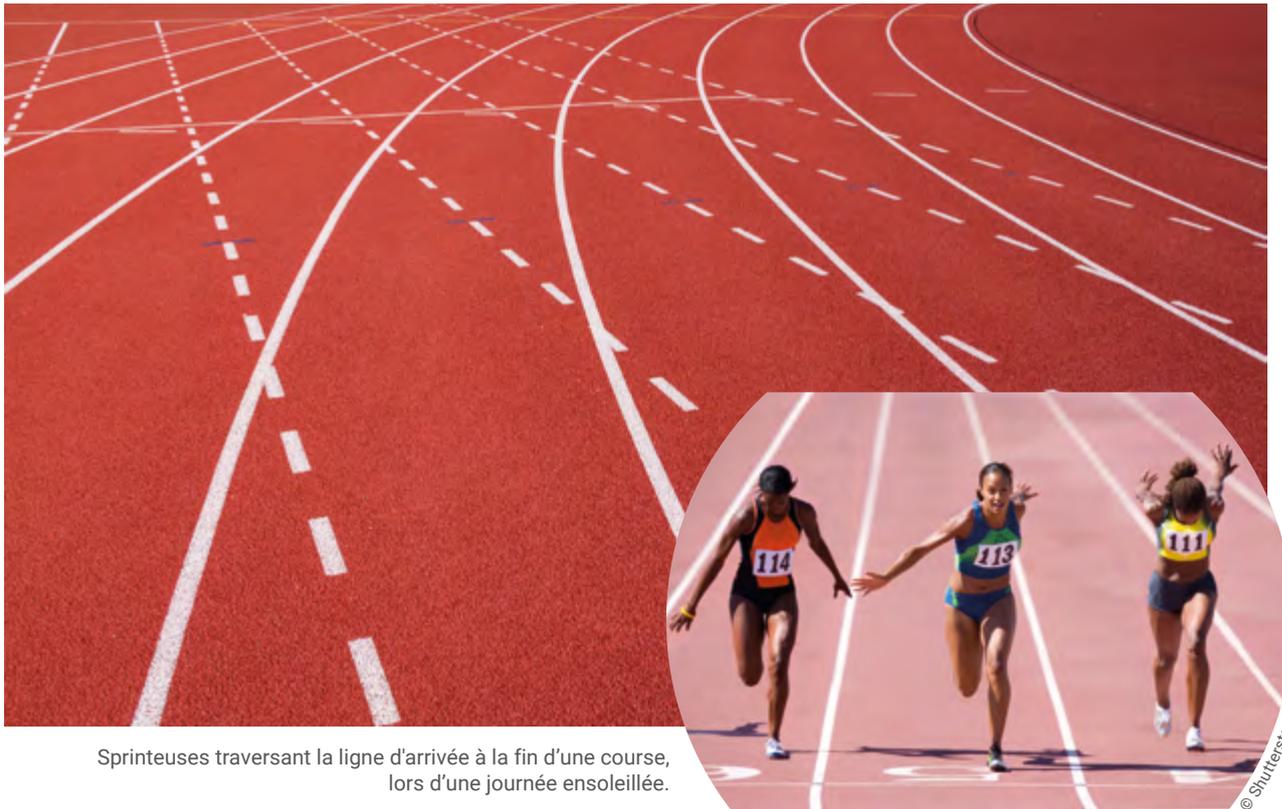
Le stade est une architecture héritée de la Grèce antique. Le mot stade (en grec, *stadion*) a trois acceptions. C'est d'abord une mesure de distance, correspondant à 600 pieds, autrement dit un peu moins de 200 mètres ; c'est aussi l'édifice sur la piste duquel se déroulent les compétitions athlétiques ; c'est enfin l'épreuve de sprint par excellence, celle qui se déroule en **ligne droite** sur la piste du stade. En Grèce, on pratiquait différents types de course : le *stadion*, une course d'un stade, soit un petit 200 mètres, le *diaulos*, deux longueurs de stade, qui était donc un petit 400 m, et une course de fond, le *dolichos*, de 7 à 24 stades. Le stade accueillait également d'autres épreuves : le lancer de javelot et le lancer de disque. Il est à noter que ces premières courses se faisaient en aller-retour, ce qui était très mauvais pour la performance. Mais les Grecs

ne cherchaient pas à mesurer la performance ! Tout d'abord, la référence de distance n'existait pas : le pied et donc le stade variaient d'un site à l'autre. Mais il n'y avait pas non plus d'instrument pour mesurer les temps et il n'était guère possible d'établir des records. En réalité, cet intérêt pour le record n'existait pas pour les Grecs. La seule chose qui était digne d'intérêt, c'était la victoire, être le premier. Les Jeux Olympiques étaient en réalité des « agônes », et ce terme d'*agôn* impliquait l'idée de compétition. Pour plus de détails, on pourra consulter les références [1, 2, 3].

Les Romains modifient la forme du stade pour l'adapter à leurs propres loisirs : ils ferment le stade, qui était en forme de U, pour en faire des cirques et des amphithéâtres. Les amphithéâtres se prêtent plus aux combats de gladiateurs, tandis que les cirques sont dévolus aux courses de chars. Si les Romains étaient surtout adeptes des sports de combat (combats

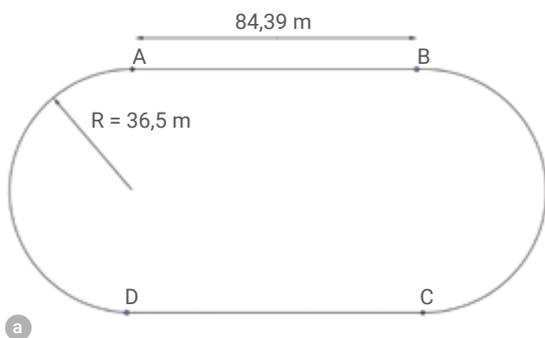
de gladiateurs, courses de chars et combats de boxe), ils ont amené également des pratiques qui relevaient de l'athlétisme. Moins populaire que les combats de gladiateurs, la course à pied faisait l'objet d'une relative méfiance de la part des Romains, qui y voyaient une activité proprement hellénique, et moins formatrice et virile que les sports de combat. La course va petit à petit se faire dans les cirques, où l'on ne va plus courir en aller-retour mais avec des virages. Une difficulté apparaît : comment négocier au mieux un virage ?

La pratique de la course se maintient dans le bassin méditerranéen, mais en 393 Théodose 1^{er}, le premier empereur romain chrétien baptisé, fait interdire les Jeux Olympiques, qu'il juge trop liés à des rites païens. Cette décision met un coup d'arrêt à la pratique de la course, qui était largement valorisée dans le cadre de ces jeux. On observe ainsi une rupture durable entre la pratique sportive antique et la pratique

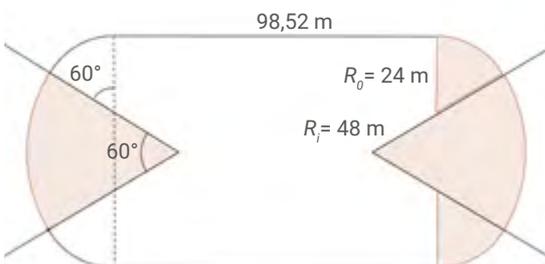


Sprinteuses traversant la ligne d'arrivée à la fin d'une course, lors d'une journée ensoleillée.

© Shutterstock



a



b

1. Formes de stades actuels.

- (a) Stade standard formé de deux lignes droites et de deux demi-cercles.
- (b) Stade en anse de panier formé de trois arcs de cercle dans la courbe.

sportive moderne, puisqu'il faut attendre le XIX^e siècle pour le retour de la course à pied chez les Anglo-Saxons, puis la mise en place de pratiques codifiées et institutionnalisées. C'est dans l'optique de renouer avec le modèle antique que Pierre de Coubertin lance en 1896 les Jeux Olympiques dits « modernes », dans lesquels l'athlétisme et la course à pied occupent une place importante. Par ailleurs, une grande partie du lexique du sport renvoie à des termes de l'Antiquité grecque ; et les stades contemporains reprennent l'architecture des amphithéâtres romains. Pour autant, c'est à l'émergence d'une nouvelle pratique sportive que l'on assiste au XX^e siècle, porteuse de valeurs très différentes de celles affichées par ces activités dans l'Antiquité romaine : l'entraînement sportif répondait en effet à des fonctions militaires, éducatives et sacrées dont il est aujourd'hui largement dépourvu, et une logique de performance et de records, absente à l'époque, domine la pratique sportive institutionnalisée. La science aujourd'hui prend toute sa place pour aider à améliorer la performance [4].

Les stades d'aujourd'hui

Les stades actuels ont des dimensions qui doivent être validées par l'union athlétique internationale, World Athletics, et sont normalisées. La piste fait 400 mètres de long à 30 centimètres de la corde, et les dimensions des stades ont été influencées par la largeur nécessaire pour inclure un stade de football, ce qui a conduit à une largeur des stades de 73 mètres. La plupart des stades, dits standards, sont formés de deux lignes droites et de deux demi-cercles. Leur largeur étant de 73 mètres, cela conduit à un demi-cercle de rayon 36,50 m et une ligne droite de longueur 84,39 m (fig. 1a). D'autres stades, dits en « anse de panier », sont aussi homologués ; leur courbe est formée de trois arcs de cercle. Cela permet des stades moins longs, mais le virage a des parties plus serrées. Ces stades en anse de panier ont été choisis pour pouvoir contenir à l'intérieur les stades de rugby (fig. 1b). En fait, la fonctionnalité multisports est de plus en plus présente dans les projets architecturaux des stades. Pour plus de détails, on pourra consulter le livre de F. Vigneau [5].

>>>

>>>

Le 100 mètres est couru en ligne droite, même si la ligne droite du stade ne fait pas 100 mètres, en rajoutant un départ sur le côté du demi-cercle (fig. 2). Pour le 200 mètres, le départ est dans le virage, décalé, pour que chacun parcoure la même distance. On voit donc qu'il y a une différence entre les lignes, car le rayon n'est pas le même. Cela est encore plus décalé pour le 400 mètres. La largeur des couloirs est de 1,22 m. Depuis le 22 mai 2023, l'attribution des couloirs dépend de la longueur de la course, mais les couloirs 1 et 2 continuent d'être affectés aux coureurs ayant réalisé les moins bons temps.

On verra plus bas que c'est sur ces deux premiers couloirs que la performance est la moins bonne. On comprend donc qu'il y a peu d'espoir de voir un gagnant sur les deux premiers couloirs !

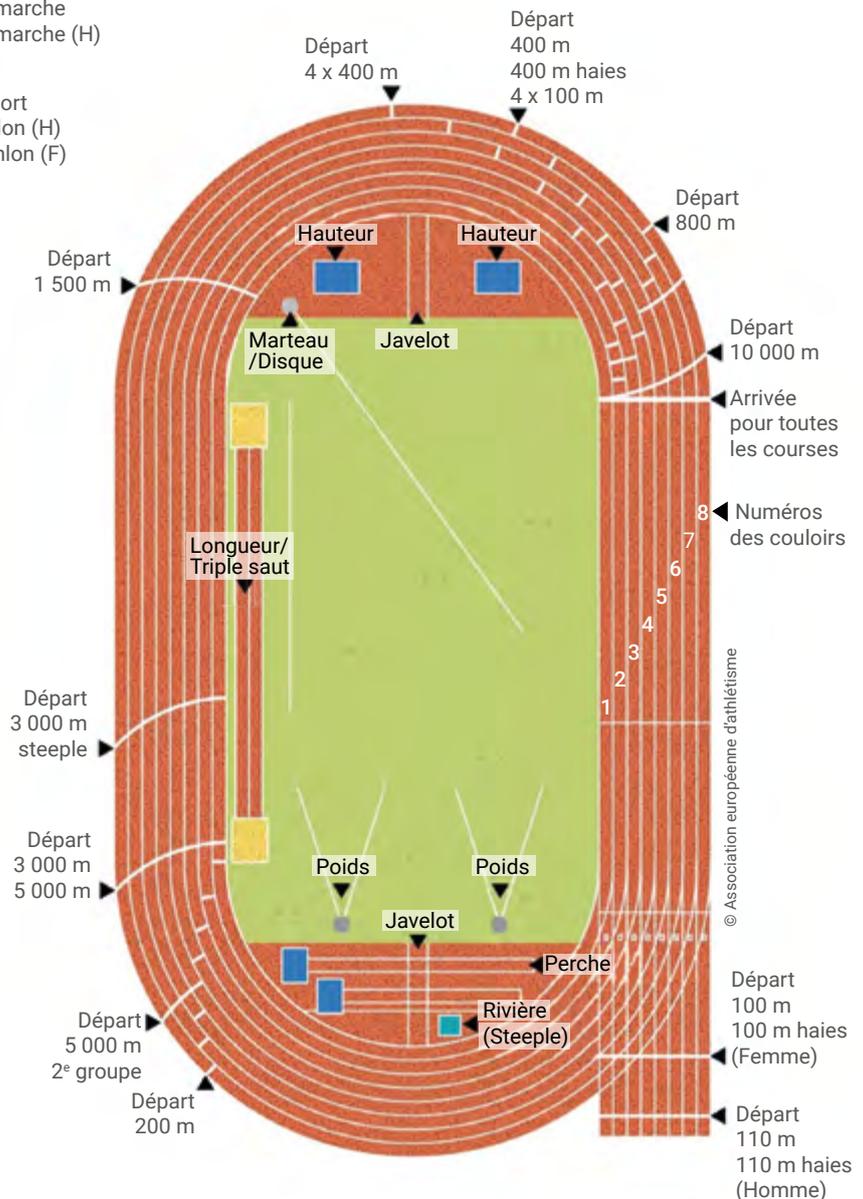
Modélisation de la course

Grâce à une modélisation de la course par des équations, nous allons comprendre les effets corrélés de la force centrifuge (qui devient moins importante au fur et à mesure qu'on s'éloigne vers les couloirs extérieurs, voir l'encadré 1) et de l'attraction psychologique générée par un athlète situé devant. Dans les couloirs extérieurs, on court en aveugle, ce qui est pénalisant. Il a été en effet mesuré qu'un athlète faisant un tour de stade (400 mètres) derrière un « lièvre » peut gagner jusqu'à une seconde par rapport à une course où il est seul.

Grâce à la conservation de l'énergie et à la seconde loi de Newton, on peut mettre la course en équations. Cela prend en compte à la fois l'énergie aérobie (ou plus précisément la VO_2 , le débit d'oxygène que l'on transforme en énergie), l'énergie anaérobie (celle qui ne vient pas de l'oxygène, mais de la phosphocréatine et du glucose) et le contrôle moteur qui est la capacité à varier sa force de propulsion. En effet, il y a un temps de réaction entre le moment où le cerveau décide de changer d'allure et la mise en place de cette action par les muscles. D'autre part, trop de variations d'allure provoque un cout dans l'effort. On a construit [6-9] un modèle de cout et bénéfice reposant à la fois sur la mécanique *via* la seconde loi de Newton, l'énergétique

Hors stade
Marathon
20 km marche
50 km marche (H)

Multisport
Décathlon (H)
Heptathlon (F)



2. Forme d'un stade et départ des courses. La longueur de la piste mesurée à 30 cm à l'intérieur du couloir 1 est de 400 mètres.

LA FORCE CENTRIFUGE

Encadré 1

Que ce soit à vélo, à moto, à cheval, à ski, en patin à glace ou en bobsleigh, les sportifs sont tous penchés dans les virages. Le coureur aussi, mais moins que le patineur, car il va moins vite ! On sait calculer la valeur de la force centrifuge : elle vaut mv^2/R , où v est la vitesse, R le rayon du cercle et m la masse de l'athlète.

Si la trajectoire n'est pas exactement un cercle, R est la valeur du rayon du cercle qui l'approche le plus. Dans le cas d'une ligne droite, le rayon est infini et il n'y a pas de force centrifuge ! En revanche, sur un stade dont le demi-cercle est de rayon $R = 36,50$ m, la force centrifuge par unité de masse est de l'ordre de $3N/kg$ pour une vitesse de 10 m/s (celle des sprinteurs). Ceci est à comparer au poids par unité de masse qui est de $9,81$ N/kg. C'est donc le tiers du poids, ce qui est loin d'être négligeable ! Donc, même s'il n'est pas évident à l'œil nu que les coureurs de sprint sont penchés, l'effet de cette force est à prendre en compte dans la performance.

et le contrôle moteur (encadré 2). Ce modèle permet, une fois que l'on se fixe une distance à courir, de déterminer comment optimiser son effort, gérer ses ressources et les contraintes pour faire le meilleur temps. Cela prend en compte la topographie du terrain (virages et côtes ou descentes), l'effet psychologique à avoir quelqu'un devant et la motivation.

Pour optimiser son effort, on montre que, du 100 m au 400 m, on court en accélérant très fort au départ, puis en décélérant en fin de course. À partir du 800 m, la course se fait avec une réaccélération en fin de course, et à partir du 1500 m, après une phase d'accélération initiale, il y a une partie centrale de la course à vitesse presque constante avant le sprint final.

Le sprint

Dans l'épreuve du 100 mètres, les athlètes ne passent pas la ligne d'arrivée en accélérant, mais plutôt en décélérant ! Ils arrêtent d'accélérer dès 60 ou 70 mètres, soit environ aux 2/3 de la course. C'est en fait qu'ils ne peuvent pas tenir leur effort maximal pendant toute la course, même si c'est l'impression qu'ils donnent. On peut le voir par exemple sur les temps mesurés tous les 10 mètres de Johan Blake, compagnon jamaïcain d'Usain Bolt et champion du monde du 100 mètres en 2011, ainsi que sur les temps d'Usain Bolt, pour son record à Berlin en 2009.

La vitesse est quasiment constante, mais baisse à partir de 60 mètres pour Blake et à partir de 70 mètres pour Bolt (tableau 1, p. 22). Cela correspond à la meilleure façon de gérer ses ressources énergétiques. Les entraîneurs le savent bien : dans tous les exercices de sprint, le départ est rapide et la fin est en décélération. On peut prouver grâce à la théorie du contrôle optimal que la meilleure stratégie est de partir à force de propulsion maximale, ce qui détermine la vitesse comme une exponentielle croissante en début de course. Mais cette force maximale ne peut être maintenue sur tout l'exercice, à cause du stock limité d'énergie anaérobie. Donc la force diminue, la vitesse aussi. Partir moins fort et accélérer tout au long de la course serait moins rentable au niveau du temps final. Cette stratégie de course

>>>

LES ÉQUATIONS DU PROBLÈME DE CONTRÔLE OPTIMAL

Encadré 2

Le modèle met en équations un certain nombre de variables : $v(t)$ la vitesse de l'athlète, $f(t)$ sa force de propulsion par unité de masse, $u(t)$ son contrôle moteur, $e(t)$ son énergie anaérobie. L'énergie de l'athlète est en effet formée de deux parties :

- l'énergie aérobie, celle qui utilise l'oxygène. L'oxydation des glucides et des graisses produit de l'énergie par la synthèse de l'ADP en ATP. La puissance aérobie est donc reliée au débit d'oxygène disponible, la VO_2 , transformé en énergie ;
- l'énergie anaérobie, celle qui ne dépend pas de l'oxygène et parfois appelée déficit d'oxygène.

Dans nos équations, la puissance aérobie est notée $\sigma(e)$, car elle dépend également par un mécanisme de rétroaction de l'énergie anaérobie résiduelle e , et pas seulement du temps ou de la distance parcourue. C'est ce mécanisme de rétroaction qui conduit à une bonne analyse des courses. Dans une course de sprint $\sigma(e)$ est une fonction linéaire décroissante de e , et donc une fonction croissante du temps (l'énergie anaérobie décroît avec le temps !). Pour les courses plus longues, la forme de la fonction $\sigma(e)$ tient compte de la cinétique de la VO_2 étudiée par les physiologistes, ce qui rend la fonction plus compliquée.

Les équations proviennent de :

- la conservation de l'énergie : la puissance développée par la force de propulsion est égale à la variation d'énergie disponible, aérobie et anaérobie :

$$f(t)v(t) = - (de/dt) + \sigma(e(t)) ;$$

- la seconde loi de Newton : l'accélération est égale à la somme des forces mises en jeu, force de propulsion diminuée des forces de frottement :

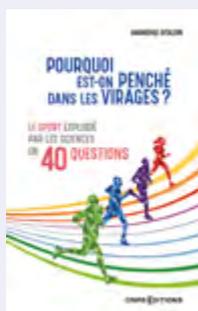
$$dv/dt = f(t) - v(t)/\tau ;$$

dans le modèle le plus simple, le frottement est linéaire en vitesse avec un coefficient de frottement τ , mais aussi bien une côte qu'un frottement lié au vent peuvent être pris en compte dans cette équation ;

- la théorie du contrôle moteur limite les variations de la force de propulsion selon $df/dt = \gamma [u(t) (F_{max} - f(t)) - f(t)]$, où γ et F_{max} sont des paramètres.

À partir de ces lois, la première étape consiste à évaluer numériquement tous les paramètres physiques et physiologiques à partir de données de course (temps et position). Ces équations permettent ensuite de résoudre le problème du contrôle optimal en minimisant, à distance et énergie anaérobie fixés, le temps final et le contrôle moteur, au sens l'intégrale de u^2 . Le modèle est une extension de celui proposé par Joe Keller [10], qui considérait la VO_2 constante et les variations de force libres. Ce modèle donne accès à la courbe de vitesse spécifique à chaque distance : le sprint en décélération sur les courtes distances, ou la forme des courses d'endurance avec les accélérations initiale et finale. Dans le cas d'un virage, le modèle le plus simple consiste à pénaliser la force de propulsion par la force centrifuge, avec la contrainte $f^2 + (v^4/R^2) \leq f_{max}^2$. Ce nombre f_{max} correspond à la force maximale de propulsion de l'athlète. On peut tenir compte de l'angle d'inclinaison et développer un modèle prenant en compte le fait d'anticiper en se redressant en fin de virage.

On pourra consulter les références [7, 8] pour plus de détails sur la course en virage, [8, 12] pour la détermination des paramètres, [6, 11] pour le sprint et [9, 11, 12] pour les courses longues.



Pourquoi est-on penché dans les virages ?

Le sport expliqué par les sciences en 40 questions

CNRS Éditions

Parution 31/08/2023

168 pages

Format : 14 × 22 cm

Cout : 20 € (broché), 13,99 € (ebook).



Distance en mètres	Temps pour 10 m de Blake	Temps pour 10 m de Bolt	Vitesse de Blake en m/s	Vitesse de Bolt en m/s
10	1,87	1,89	5,35	5,29
20	1,02	0,99	9,80	10,10
30	0,93	0,9	10,75	11,11
40	0,88	0,86	11,36	11,63
50	0,86	0,83	11,63	12,05
60	0,85	0,82	11,76	12,20
70	0,86	0,81	11,63	12,35
80	0,86	0,82	11,63	12,20
90	0,87	0,83	11,49	12,05
100	0,88	0,83	11,36	12,05

Tableau 1. Temps et vitesse de Yohan Blake et d'Usain Bolt, mesurés sur une distance de 10 mètres le long d'une course de 100 mètres.

>>>

est la même du 100 m au 400 m, qui sont des courses où la VO_2 , le débit d'oxygène, augmente, sans atteindre de palier.

La course d'endurance

« Rien ne sert de courir, il faut partir à point » nous dit la fable, et c'est tout à fait vrai pour la course d'endurance : si on part trop fort, c'est bien connu, on a du mal à terminer et surtout à produire l'accélération finale décisive ; au contraire, si on part trop lentement, certes, on garde des réserves, mais on n'arrive jamais à rattraper le temps perdu. Il est donc très important de trouver la bonne vitesse d'accélération au démarrage d'une course longue.

Une course longue est caractérisée par le fait que la VO_2 , le débit d'oxygène, augmente, atteint un palier et diminue. Pour les courses sur piste, c'est le cas à partir du 1500 mètres. Une course longue se court en trois parties [11] :

- Une phase d'accélération pour atteindre la vitesse pic, qui est supérieure à la vitesse de croisière. Cette phase d'accélération se court en « anaérobie », et elle a pour rôle de lancer le cycle aérobie, c'est-à-dire afin que le débit d'oxygène qui est transformé en énergie augmente. Pour que cette mise en route du cycle aérobie soit rapide, il est important d'accélérer fort afin d'augmenter plus vite le débit cardiaque. On atteint alors une vitesse pic qui est supérieure

à la vitesse de croisière. La meilleure stratégie est alors de ralentir au moment où le maximum du débit d'oxygène est atteint pour se placer à la vitesse de croisière. Une autre stratégie qui consisterait à n'accélérer que jusqu'à la vitesse de croisière (peut être légèrement plus élevée alors) conduirait à un temps final plus important. De même, une stratégie qui consisterait à accélérer moins fort au début pour éventuellement avoir une vitesse de croisière plus élevée conduirait à un temps final plus important.

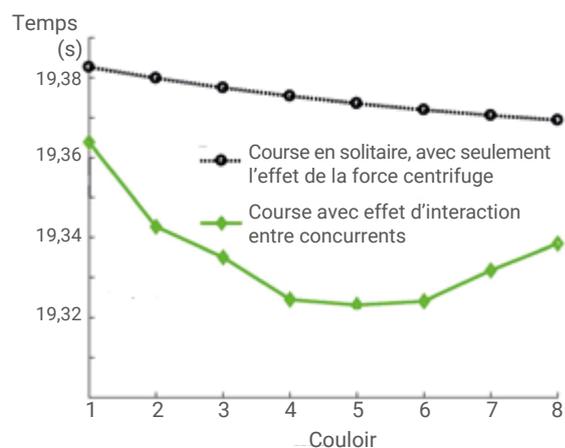
- Une phase intermédiaire de course, qui repose essentiellement sur l'énergie aérobie. Plus la VO_2 (débit d'oxygène) est grande, plus la vitesse de croisière est élevée. Cette vitesse n'est pas exactement constante s'il y a des virages ou des côtes. Il peut être utile de varier légèrement sa vitesse autour de cette vitesse de croisière moyenne, indépendamment de la stratégie.
- La phase de sprint finale, qui repose sur l'énergie anaérobie résiduelle. Il y a un mécanisme de rétroaction dans le corps qui fait que quand les réserves anaérobies atteignent un tiers de la valeur de départ, le débit d'oxygène transformé en énergie diminue. C'est alors le moment pour commencer à lancer le sprint final. Si le coureur a trop accéléré au début, il ne lui reste plus assez de réserves anaérobies pour le sprint final.

Sur les longues distances, on peut analyser les effets stratégiques qui consistent souvent à forcer les adversaires à une accélération en milieu de course : ceci les oblige à tirer sur leurs réserves anaérobies et pénalise les athlètes les moins résistants sur le sprint final de fin de course.

Une bonne tactique : suivre quelqu'un qui a le même rythme que soi, cela permet d'économiser de l'énergie et donc du temps. Ce n'est pas juste un effet pour se protéger du vent comme les cyclistes, c'est un effet psychologique, car on n'a pas à réfléchir à son rythme et on tient plus longtemps. Encore faut-il que ce soit le bon rythme...

Et les virages ?

Pour une course de 200 mètres, le départ se fait dans le virage. Il faut prendre en compte dans le modèle une diminution du frottement effectif si l'on a quelqu'un devant, mais cet effet ne doit pas être actif si l'on vient d'être doublé car il y a un temps de réaction. Cela permet d'étudier le temps d'un 200 m d'un champion en fonction du couloir. Le modèle inclut l'effet positif à courir derrière un lièvre : si l'on court seul, plus le couloir est extérieur, meilleur est le temps (fig. 3, courbe noire). Au contraire, si l'on court avec un concurrent dans la ligne à côté, la performance est la meilleure pour les lignes 4 à 6 où l'effet de la force centrifuge et l'effet psychologique se conjuguent (fig. 3, courbe

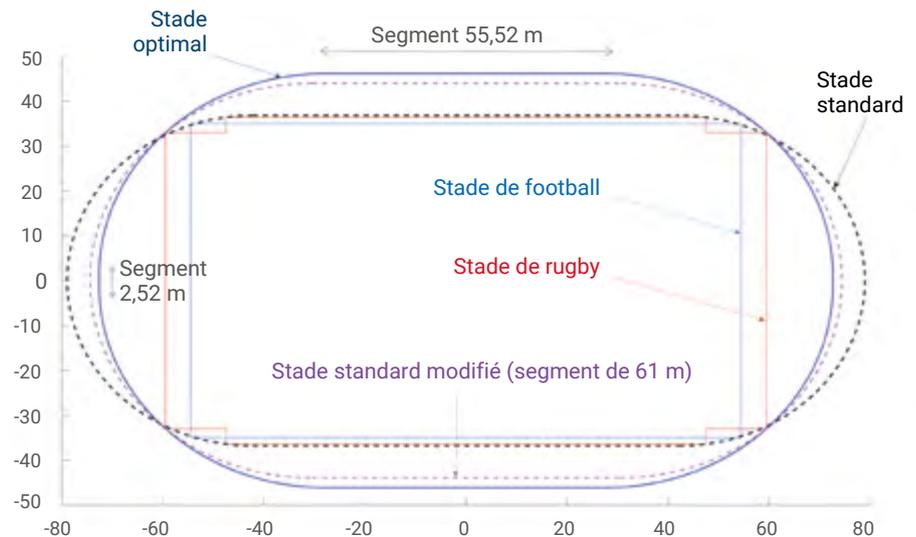


3. Temps (en secondes) d'un champion sur une course de 200 mètres en fonction du couloir.

Courbe noire, avec juste l'effet de la force centrifuge : le temps diminue quand le couloir est extérieur. Courbe verte, avec l'effet d'interaction d'un coureur sur d'autres lignes : les meilleurs couloirs sont au centre.

verte). Ensuite, les lignes 7 et 3, puis 8 et 2 sont équivalentes, mais le couloir 1 est fortement pénalisé. Ceci est finalement cohérent avec le tirage au sort des compétitions, qui consiste à mettre les meilleurs coureurs dans les lignes 3 à 6 qui permettent les meilleures performances.

Une question naturelle est ensuite de se demander quelle est la forme optimale du stade permettant de battre les records actuels, réduisant les écarts entre les couloirs, et éventuellement contenant les stades de football et de rugby. La piste optimale est évidemment la ligne droite. Si l'on impose une piste fermée, la piste optimale est une piste circulaire de 63 mètres de rayon. Ceci a évidemment des inconvénients notables en matière de visibilité des spectateurs, mais avait pourtant été évoqué dans les années 1960 en France. Si l'on impose que la piste doit contenir des lignes droites afin de se rapprocher d'un 100 mètres en ligne droite, la piste optimale est alors formée de deux lignes droites et de deux demi-cercles. Mais le calcul de performance nous indique en fait que plus la ligne droite est courte, meilleur est le temps du champion. Pour une ligne droite de moins de 60 mètres, la différence de temps se fait au millième avec la course entière en ligne droite. Mais, entre une ligne droite de 60 mètres et une de 84,39 mètres, on gagne dans le premier cas deux centièmes sur un 200 mètres, et surtout on réduit l'écart entre les lignes extrêmes de huit centièmes à deux centièmes. Pour le 10 000 mètres, cela permettrait de gagner entre 5 et 10 secondes. En effet, plus la ligne droite est courte, plus le rayon du virage est large, et donc meilleure est la performance. L'inconvénient d'un tel stade est qu'il serait du coup un peu court pour le javelot et éloignerait les spectateurs de l'arène. En 2020 [8], nous avons proposé un stade optimal contenant les stades de football et de rugby en raccourcissant les lignes droites et en rajoutant une portion de ligne droite de 2,52 m au milieu du virage (partie verticale). En effet, les stades standard avec virage en demi-cercle ne contiennent pas de stade de rugby. Seuls les stades en anse de panier le font, mais ils sont très mauvais pour



4. Comparaison entre diverses formes de stades. Stade standard (noir), avec une ligne droite de 84,39 mètres et un rayon de 36,5 mètres, et stade avec une ligne droite raccourcie à 61 mètres (en violet). Stade de football en bleu clair, stade de rugby en rouge, et stade optimal en bleu contenant le football et le rugby.

la performance en course et surtout génèrent des différences de plusieurs dixièmes entre les lignes extrêmes. Mais un nouveau stade comme celui illustré sur la figure 4 n'est pas encore homologué par la fédération internationale d'athlétisme. Une inquiétude est qu'il devienne à terme trop court pour le javelot.

On voit bien que l'évolution depuis les Grecs qui couraient en aller-retour est considérable. Le couloir, la négociation

du virage, sont importants. Le modèle proposé, en adaptant l'équation de mécanique, peut se généraliser à d'autres sports de sprint ou d'endurance comme le patinage, l'aviron ou le vélo, et à toute topographie (côte, descente) ou situation de vent. Retenons que la force de propulsion n'est jamais constante même en sprint, et que c'est un couplage des équations d'énergétique, de contrôle moteur et de mécanique qui permet de comprendre la performance optimale. ■



- 1• W. Decker et J.-P. Thuillier, *Le sport dans l'Antiquité : Égypte, Grèce, Rome*, A. et J. Picard (2004).
- 2• J.-P. Massicote et C. Lessard, *Histoire du sport de l'Antiquité au XIX^e siècle*, Presses de l'Université du Québec (1984).
- 3• T. Terret, *Histoire du sport*, collection Que sais-je ?, Presses Universitaires de France (2019).
- 4• A. Aftalion, *Pourquoi est-on penché dans les virages ? - Le sport expliqué par les sciences en 40 questions*, CNRS Éditions (2023).
- 5• F. Vigneau, *Les espaces du sport*, collection Que sais-je ?, Presses Universitaires de France (1998).
- 6• A. Aftalion, *SIAM Journal on Applied Mathematics*, **77** (2017) 1320-1334.
- 7• A. Aftalion et P. Martinon, *PLoS ONE*, **14** (9) (2019) 0221572.
- 8• A. Aftalion et E. Trélat, *Royal Society open science*, **7** (2020) 200007.
- 9• A. Aftalion et E. Trélat, *Journal of Mathematical Biology*, **83**, 9 (2021).
- 10• J.B. Keller, *Phys. Today* **26** (1973) 43-47.
- 11• A. Le Hyaric, A. Aftalion et B. Hanley, "Modeling the optimization of world-class 400 m and 1500 m running performances using high-resolution data", à paraître dans *Frontiers in Sports and Active Living*.
- 12• Q. Mercier et al., *Frontiers in Sports and Active Living* **2** (2021) 636428.