

Science 2024[®] : quand scientifiques et sportifs s'associent pour repousser les limites

D'après la conférence de Christophe Clanet, Professeur à l'École Polytechnique. Directeur du programme « Sciences 2024 » créé pour les Jeux Olympiques de Paris.

Introduction : **Sport et science** **sont indissociables**

Le sport, c'est fixer des objectifs physiques au corps et à l'esprit humains. Il ne s'agit de rien d'autre que la manifestation du besoin de curiosité et de dépassement propres à la nature humaine dont l'esprit de découverte est une caractéristique fondamentale.

Cette ambition impose d'observer le corps humain, son esprit, ses capacités d'adaptation, ses limites et la façon de les dépasser et d'assimiler les 100 façons d'aborder ou de se confronter avec l'environnement naturel. Cela conduit aussi à l'invention et à l'observation des « artefacts » (outils, équipements) et des réactions personnelles ou collectives qu'ils provoquent.

Essayons une synthèse : **observer mais surtout comprendre, pratiquer, et progresser. Tout cela est un appel à la science... n'est-ce pas évident ?** Les Jeux Olympiques concrétisent cette ambition de façon exemplaire.

1 Lien entre la science et le sport

1.1. Déjà aux origines : mesures et chiffres

Commençons nos observations par l'examen de la course à pied.

Pour examiner les courses de près, il est éclairant de tracer la **vitesse moyenne de la course**, c'est-à-dire la distance de la course divisée par le temps en fonction de la distance de course. La **Figure 2** fait apparaître deux régimes.

Dans la première partie, la vitesse moyenne augmente avec la distance de course : c'est le régime sprint (ici sur fond rouge). La deuxième partie où la vitesse moyenne diminue avec la distance de course définit nos courses de demi-fond et de fond (sur fond bleu).

Pour utiliser des courses pour honorer les dieux (**Encart «Origine des Jeux Olympiques»**), il faut des courses avec des vitesses moyennes élevées. Si jamais vous choisissez votre distance de course trop courte, Dieu ne va pas être content, et si elle est trop longue, cela ne va pas l'intéresser non plus.

Donc il faut sélectionner quelque chose plus proche de l'optimum et... c'est ce qui est fait par les Grecs ! La **Figure 3** représente le stade d'Olympie, qui a une longueur de 192 mètres. Cela correspond au maximum qui apparaît sur la **Figure 2**, ce qui nous indique que les Grecs avaient nos connaissances et « mesuraient ». La culture « mesure et chiffre » est adoptée aussi bien par les sportifs que par les scientifiques. Les sportifs mesurent... depuis toujours.

ORIGINE DES JEUX OLYMPIQUES

Nous sommes en 2024, mais n'oublions pas qu'il y a eu des Jeux régulièrement dans l'Antiquité, organisés en Grèce depuis l'année -776 jusqu'à l'année -393. Ils étaient organisés tous les quatre ans, ce qui fait qu'il y en a eu 292 éditions. Ils comportaient un grand nombre d'épreuves (**Figure 1**).



Figure 1

Les Jeux Olympiques antiques.

Les Jeux sont apparus pour des questions religieuses à Olympie parce que c'est l'endroit où Zeus a vaincu son père Chronos. On va les arrêter en 393 lorsqu'on va passer du polythéisme au monothéisme, religion officielle de l'Empire romain depuis l'empereur Constantin. Il n'y a plus de raison d'honorer les dieux puisqu'il n'y en a plus qu'un.

Il y a une autre remarque que l'on peut faire pour ces Jeux Olympiques anciens, c'est que les premières épreuves, des épreuves de courses, étaient à la fois pour les hommes et pour les femmes, qu'on appelait les Héraïa.

1.2. Enjeux de la collaboration entre scientifiques et sportifs à l'approche des JO

S'il y a des points communs entre les Jeux antiques et les Jeux modernes, il y a aussi des différences. Ainsi, il y a beaucoup plus d'épreuves aujourd'hui : 330. En conséquence, 330 médailles d'or seront décernées à Paris. Environ 10 000 athlètes vont concourir et 13 milliards de frais d'organisation sont engagés, ce qui revient à environ 1,3 million d'euros par athlète.

La **Figure 4** fait ressortir une intéressante typologie des épreuves sportives en montrant leur diversité. Il y a beaucoup de **sport à record** : 184 sur les 333. Il y a aussi des **sports de balle**, des **sports à jury** et des **sports de combat**. La plupart des exemples traités dans ce chapitre figurent dans la première catégorie, les sports à record.

Mais restons sur la question : qu'en est-il des relations entre la science et le sport ? Reformulons-la : « Est-ce que cela a du sens de coupler les scientifiques à des sportifs ? » Les sportifs se débrouillent bien depuis des années. Qu'est-ce que les scientifiques vont faire là-dedans ?

Le point de départ a été d'observer que les nations qui performaient actuellement aux Jeux Olympiques sont aussi celles qui font de la recherche.

La **Figure 5** présente le **podium des nations qui publient le plus**. Viennent en premier les États-Unis, puis la Chine et enfin la Grande-Bretagne, d'après un article paru dans

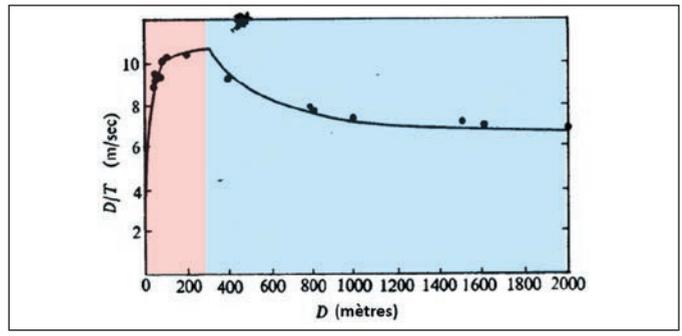


Figure 2

Courbe de l'évolution de la vitesse moyenne des coureurs en fonction de la distance totale de la course.



Figure 3

Photographie du stade d'Olympie.

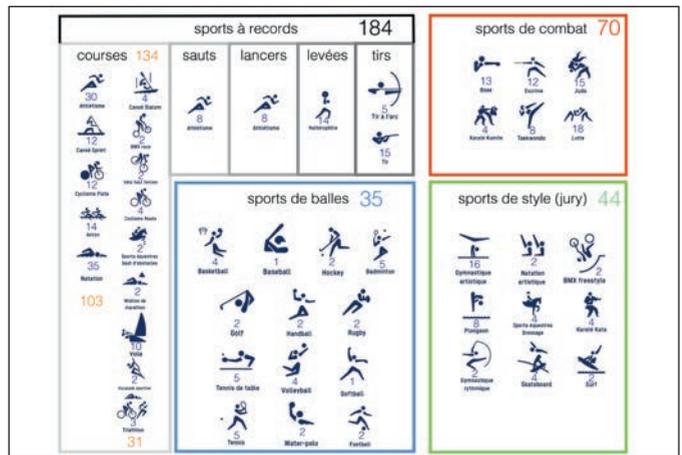


Figure 4

Répartition des 333 sports olympiques modernes.

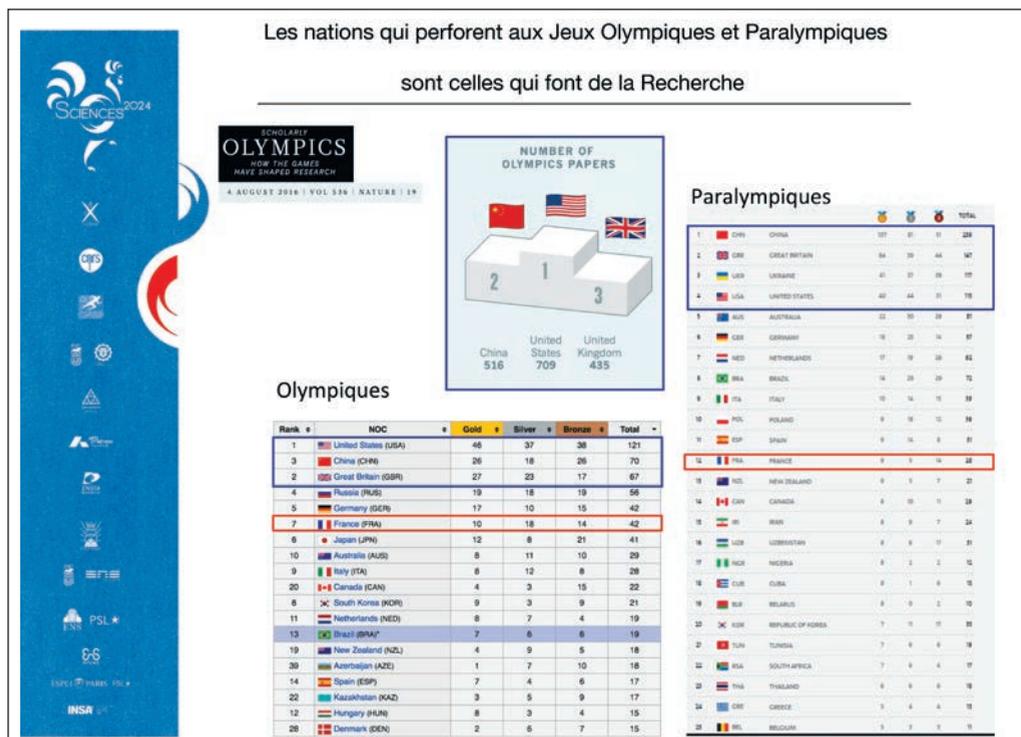


Figure 5

Mise en perspective des nations qui gagnent aux JO et celles qui font de la recherche une priorité.

Nature en 2016. Si on compare ce podium au **podium olympique**, c'est-à-dire celui du nombre de médailles, vous avez les États-Unis en premier, la Chine en deuxième, la Grande-Bretagne en troisième : **c'est le même podium** ! Pour la partie paralympique, c'est à peu près les mêmes, mais pas dans le même ordre : les Chinois sont en première place, les Anglais à la deuxième, les Ukrainiens viennent s'intercaler et les Américains sont quatrièmes.

Dans ces classements, où est la France ? Nous sommes septièmes en Olympiques et douzièmes en Paralympiques, c'est l'argument qui nous

a fait recevoir les Jeux à la maison. Mais nous avons l'impression que les sciences dures n'étaient pas investies auprès des sportifs de France, qu'il n'y avait pas d'enthousiasme pour se mettre à leur disposition. C'est ainsi que le **programme «Science 2024»** a été lancé. Il est piloté par l'École Polytechnique depuis sa création et regroupe 15 grandes écoles dans lesquelles une soixantaine de chercheurs se sont mobilisés. Cela a été le point de lancement de différentes études. Celles sur lesquelles nous allons le plus travailler sont celles qui sont financées par le programme d'État dédié.

2 Premier exemple d'étude : la science au service du tir à l'arc !

Le cadre de l'étude est la thèse de Tom Maddalena sur la **physique des sports de tir** (pour lui, il s'agissait du tir à la carabine). Les compétences de l'équipe en tir sont résumées sur la **Figure 6** : 22 Long Rifle (c'est une épreuve qui se fait à 50 mètres), tir au pistolet laser pour le pentathlon moderne puis tir à l'arc avec Florian Billoue. Ces études ont été coencadrées par Caroline Cohen.

La rencontre se fait à l'extérieur pour le tir à l'arc, la cible est à 70 mètres, le disque de la cible mesure 12 centimètres. En général, les Coréens sont en finale, car il y a une très grande école d'archers en Corée. Jean-Charles Valladont est notre champion. Dans la phase de qualification, pour savoir qui affronte qui, 72 flèches sont tirées. Donc le score maximal est de 720, et le premier va affronter le dernier, le deuxième l'avant-dernier, etc.

La **Figure 7** a été prise pendant la finale de 2016. Quelques chiffres : la distance, c'est 70 mètres, la vitesse caractéristique U_0 en sortie de la flèche est de 60 mètres par seconde, la flèche pèse 20 grammes et elle mesure 70 centimètres. Les durées de vol sont entre 1 et 1,2 seconde en l'air. La précision angulaire à respecter est de 0,1 degré.

La question posée est : comment optimiser la force de l'arc pour un archer qui vous a été indiqué par la Fédération Française ? Dans le cas de l'étude, c'était Florian Billoue.



Figure 6

Intervenants dans la thèse de Tom Maddalena sur le tir sportif.

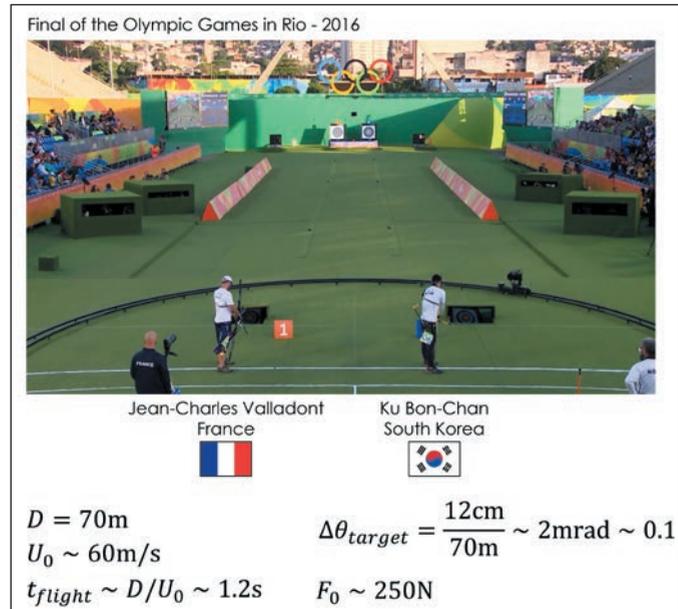


Figure 7

Finale de tir à l'arc aux JO de 2016 à Rio : les données.

Il faut alors l'équiper d'un dispositif qui permet de regarder et de suivre toutes les étapes de son processus de visée pour

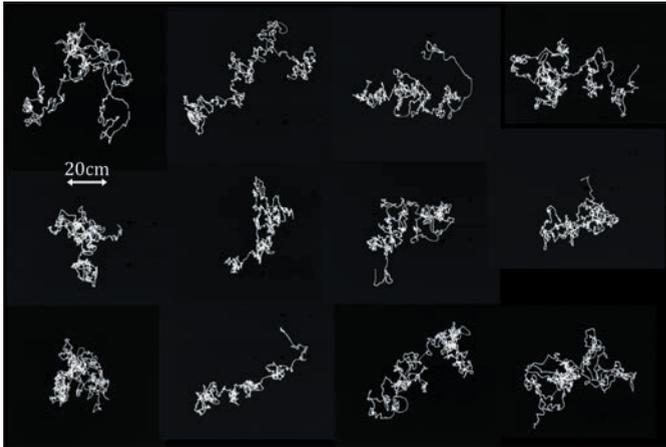


Figure 8

Représentation de la direction que pointe le carreau de la flèche.

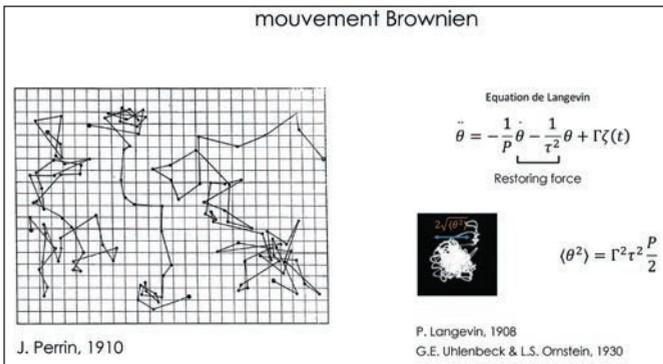


Figure 9

Équation de Langevin et mouvement brownien, ou description mathématique d'un mouvement uniforme entre deux chocs aléatoires, qui sont les seules sources de perturbation.

essayer de comprendre les effets de la force de l'arc.

La phase suivante est l'examen des clichés de la direction que pointe la flèche, et en particulier les traces proches du point d'impact (Figure 8). En résulte la remarque classique : «Tiens, ça ressemble vraiment au mouvement

brownien¹ qu'on observait avec du pollen dans de l'éthanol.»

Nous avons donc fait appel à la description physique connue du mouvement brownien utilisant l'équation de Langevin (Figure 9), mais ne rentrons pas ici dans le traitement mathématique.

Dans le processus de la visée, il y a du bruit mais aussi, simultanément, du contrôle : on veut viser un endroit donné, mais d'une part une force de rappel et d'autre part une force d'amortissement influencent le résultat.

Regardons la « pelote », comme on désigne ce petit nuage de points autour de l'impact. La physique nous donne les informations sur les paramètres de la pelote. Plus le temps caractéristique de contrôle est court, plus la pelote sera petite ; de la même façon, plus le temps caractéristique de l'amortissement sera court, plus petite sera la pelote. Évidemment, plus grand sera le bruit, plus grande sera la pelote. L'examen de la pelote informe sur la « perturbation à la cible » et la « précision à la cible » rattachées à deux paramètres : le « **bruit humain** » et le « **bruit aérodynamique** » qui donnent accès à l'optimum qui nous intéresse (Figure 10).

On peut ainsi résumer les comportements : si la force de l'arc est plus forte, la perturbation à la cible sera plus forte et le bruit humain va croître. De même, plus la

1. Une description mathématique du mouvement aléatoire d'une «grosse» particule immergée dans un liquide et qui n'est soumise à aucune autre interaction.

force de l'arc est grande, plus la vitesse de départ est importante, et donc plus le temps d'interaction entre la flèche et l'air est court. Et le bruit aérodynamique diminue.

Les résultats de ces examens et mesures sur la performance de Florian sont présentés sur la **Figure 10** qui trace le bruit humain et le bruit aérodynamique en fonction de la force de l'arc. L'optimum se déduit du bruit total, somme des deux composantes, et correspond à son minimum. Nos expériences ont calculé pour Florian, ce jour-là, un optimum de 20 kilos pour l'arc. Mais attention ! Il y a une valeur d'optimum par jour et par archer, qui dépend de la forme physique et psychique de chacun. **Il y a chaque fois une caractéristique individuelle à coupler à une caractéristique du sport.**

3 Deuxième exemple d'étude : la science au service de la natation

Le deuxième exemple, ce sera la natation.

Les données viennent de la thèse de Charlie Prétot, qui a été encadrée par Rémi Carmigniani à l'École des Ponts (**Figure 11**). Les épreuves se sont déroulées dans le bassin de l'INSEP pour la natation et à la Fédération de handisport.

La thèse a été financée dans le cadre d'un programme dédié à la recherche sur le sport élite lancé par l'État en 2019 sous la gouvernance d'Édouard Philippe, Premier ministre. Le financement total prévu, de 20 millions d'euros, a financé 12 projets sur quatre ans.

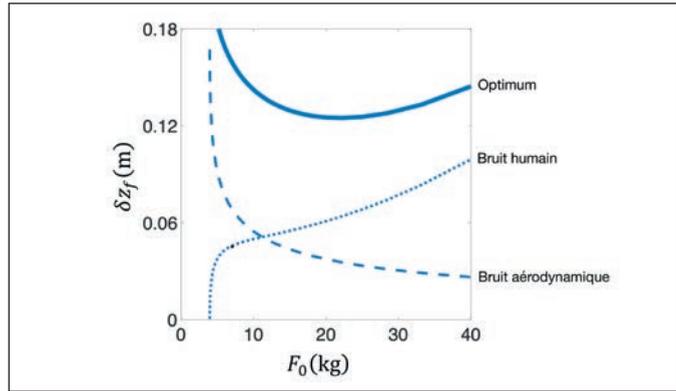


Figure 10

Optimum entre le bruit humain et le bruit aérodynamique.



Figure 11

Thèse sur la physique de la natation.

3.1. L'étude

La recherche a été conduite avec la participation de Michel Chrétien, l'entraîneur de Maxime Grousset. Il a été décidé de travailler sur les départs, parce qu'en regardant les champions, on voit que ce n'est pas dans la phase de nage que les progrès se sont faits, mais dans les phases de départ et dans les phases de virage.

En pratique, avec les indications de l'entraîneur, on

récolte les informations sous forme de vidéos et de films qui permettent de rapidement déduire les caractéristiques physiques du plongeon et du virage, puis de reconstituer les différentes phases au cours desquelles les efforts peuvent être adaptés et personnalisés.

Un exemple : la tête va rentrer à 3,6 mètres du plot, l'entrée se fait à une vitesse de 6 mètres par seconde, donc à trois fois la vitesse de nage. Résultat : au début, le nageur est au repos avec une phase sous-marine de glisse, puis au bout d'un moment, il s'active (**Figure 12**). Le nageur doit décider à quel moment il s'active et se régler pour remonter à 15 mètres, que ce soit dans l'entrée ou pour les virages. Quinze mètres, c'est la règle choisie pour qu'on puisse bien voir et photographier les nageurs.

précisément la trajectoire qui a été suivie, le moment où le nageur s'active, les réalisations des plongeurs, des virages... L'analyse est faite en deux ou trois jours de façon à fournir rapidement quelques chiffres caractéristiques à l'entraîneur (voir chapitre d'Adrien Sedeaud). Des méthodes numériques particulières (réseaux de neurones) ont été mises au point pour cela. Des propositions argumentées sur l'optimisation sont communiquées à l'entraîneur et au sportif.

Dans une deuxième phase, des analyses scientifiques des données plus complètes, incluant des comparaisons avec d'autres cas, sont faites. Elles ne concernent plus le nageur directement, mais donnent l'occasion de contacts fructueux, qui font progresser le domaine, entre entraîneurs et physiciens.

3.2. Le modèle

Dans ce processus d'étude, la captation vidéo puis le traitement des données permettent de récupérer les bons paramètres pour décrire

4 Troisième exemple d'étude : la science au service du cyclisme

Le cyclisme a été l'un des douze projets financés. Il y a

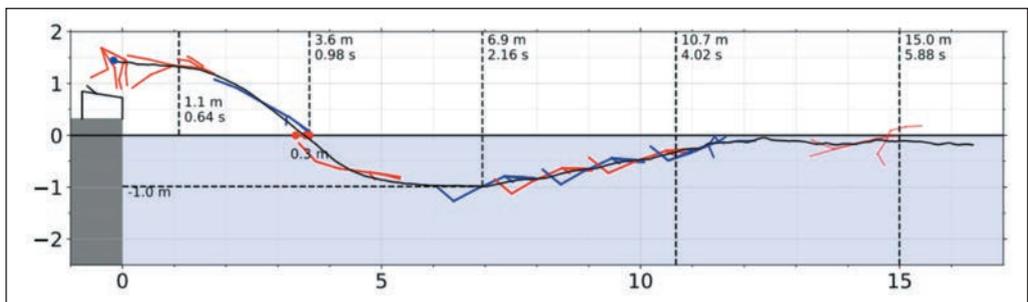


Figure 12

Modélisation de la trajectoire du nageur.

cinq disciplines en cyclisme : la route avec deux épreuves (le contre-la-montre et la course), le BMX (freestyle et race), le Mountain Bike (donc le VTT) ; et le Track, avec au total douze épreuves. Il n'y a pas d'épreuves mixtes, il y a donc deux médailles à chaque fois (hommes et femmes), soit vingt-deux médailles au total en cyclisme (Figure 13).

4.1. Point historique

L'épreuve traitée en exemple est «route et piste». En fait, ces deux épreuves sont couplées depuis le début et traitées ensemble.

Initialement, dans le cyclisme, il y avait les épreuves en vélodrome. Le vélodrome est une ancienne piste qui est fermée où on peut mettre au point des épreuves à techniques sophistiquées, particulièrement difficiles.

L'épreuve la plus dure au vélodrome est l'«**épreuve des six jours**» qui a connu la célébrité pendant de nombreuses décennies. La règle est très simple : celui qui parcourt le plus de kilomètres en six jours gagne. Il y a un optimum à trouver entre le nombre de kilomètres, le temps de sommeil et la fatigue. Historiquement, l'optimum a été réalisé par Major Taylor qui parcourait 2300 kilomètres en six jours. Les «six jours du vélodrome» vont être le point de départ du **Tour de France qui a été explicitement créé pour faire plus dur que le plus dur**. Au début, le Tour de France se faisait donc en six jours (Figure 14), dans des conditions difficiles, car il y a des montagnes, du vent, etc. Donc,



Figure 13

Répartition des épreuves de cyclisme.

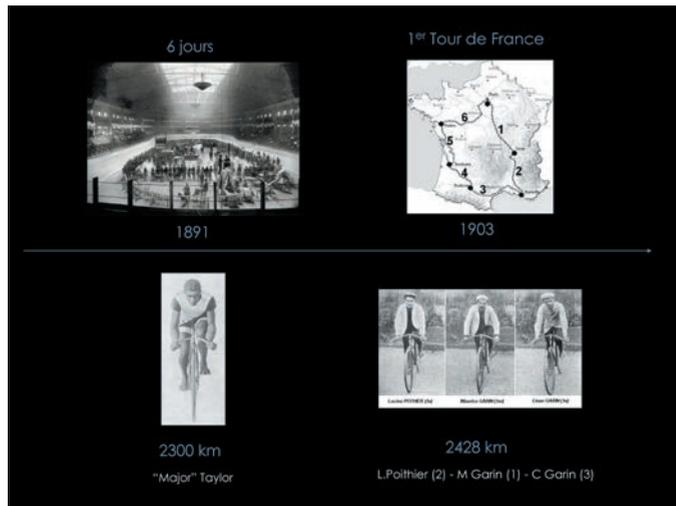


Figure 14

Histoire du cyclisme.

en 1903 : première étape, Paris-Lyon, deuxième étape, Lyon-Marseille, troisième étape, Marseille-Toulouse, quatrième étape, Toulouse-Bordeaux. Bordeaux-Nantes

2019	Leader	Grimpeur	Sprinter
 3 366 km	 Egan Bernal 22 y.o. 1.75 m 60 kg 40,576 km/h	 Romain Bardet 29 y.o. 1.84 m 65 kg	 Peter Sagan 29 y.o. 1.82 m 79 kg
 3 546.8 km	 Richard Carapaz 26 y.o. 1.70 m 62 kg 39.41 km/h	 Giulio Ciccone 24 y.o. 1.76 m 58 kg	 Pascal Ackermann 25 y.o. 1.80 m 78 kg
 3 291 km	 Primož Roglič 30 y.o. 1.77 m 65 kg 39,587 km/h	 Geoffrey Bouchard 27 y.o. 1.77 m 64 kg	 Primož Roglič 30 y.o. 1.77 m 65 kg

Figure 15

Grandes courses cyclistes de 2019 et maillots associés.

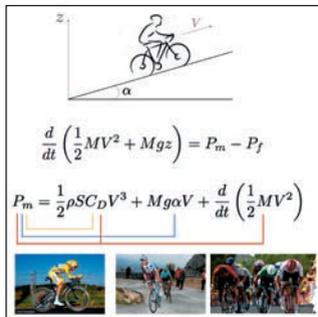


Figure 16

Répartition de l'énergie physique d'un cycliste.
 P_m : puissance du cycliste.
 En jaune : friction aérodynamique.
 En bleu : gravité.
 En rouge : variation temporelle d'énergie cinétique.

pour la cinquième et on revient sur Paris pour la sixième. **Génétiquement, ces deux épreuves, les « Six Jours » et « Le Tour de France », sont couplées.** Cela étant, ces deux épreuves ont évolué différemment.

4.2. Le cyclisme de route

Il y a trois grands tours définis par l'UCI² : le Tour de France, le Giro italien et la Vuelta espagnole (Figure 15). Dans chacun de ces tours, on décerne trois maillots, quel que soit le tour : un pour le leader, un pour le grimpeur, un pour le sprinter. Il y a aussi le maillot blanc du meilleur jeune.

L'objectif fixé au physicien est de connaître et comprendre les facteurs qui jouent sur les performances du cycliste qui dispose, à la base, de son énergie mécanique, composée de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle (Figure 16). Ce qui va faire varier cette énergie mécanique

au cours du temps, c'est la puissance qu'injecte l'athlète, diminuée de la puissance qui se dissipe par friction. Mais la puissance mécanique de l'athlète va être une caractéristique individuelle.

Les trois maillots caractérisent la puissance mécanique de l'athlète : le meilleur rouleur (celui qui gagnera les contre-la-montre et finira maillot jaune), le meilleur grimpeur et le meilleur sprinter. Donc, les trois maillots ont une origine physique. On voit que les sciences et le sport, malgré les apparences, sont très liés.

C'est ce couplage qui est étudié en vue de l'optimiser et de proposer ces optimisations aux entraîneurs qui en feront ce qu'ils voudront.

4.3. Le vélodrome

La Figure 18 indique les différentes courses qui se déroulent dans un vélodrome. Pour chacune d'entre elles, l'adaptation entre l'athlète et l'objectif est spécifique. Le physicien va traduire ces spécificités en recommandations aux athlètes qui devront optimiser leurs performances en fonction de leurs caractéristiques personnelles et de celles de leur matériel.

Les **sprinters** vont avoir trois épreuves aux Jeux de Paris (Figure 18). Le match, c'est l'épreuve du chat et de la souris. Pour savoir qui fait le chat et qui fait la souris, il y a un classement préalable. Cela s'appelle le « 200 mètres lancés » : le cycliste parcourt 1 kilomètre, mais seuls les 200 derniers mètres sont chronométrés. Celui qui fait

2. Union Cycliste Internationale.

LE VÉLODROME NATIONAL

Quand vous rentrez dans le vélodrome, voici ce que vous voyez (Figure 17). Au milieu, c'est le paddock, là où sont les vélos. Puis il y a une piste sur laquelle plusieurs zones sont tracées. La partie verte, c'est la zone de sécurité. Vous ne pouvez pas y rouler, sauf quand vous tombez. La partie bleue, c'est la côte d'azur. Vous pouvez y rouler, mais vous ne pouvez pas y rester.

Ensuite, commence la piste. Elle a une largeur constante tout au long, qui n'est pas fixée et peut varier entre 6 et 7 mètres.



Figure 17

Le vélodrome.

Sur cette piste, vous avez différents traits. Le trait du bas (la ligne noire) fixe la longueur nominale du vélodrome : 250 mètres pour les vélodromes olympiques. Le trait rouge, c'est la ligne des sprinters. Toutes les épreuves de sprint se passent entre la noire et la rouge. La ligne bleue, c'est la ligne des stayers. Et puis, le plus haut possible, c'est la balustrade.

Dans les lignes droites, la pente est de 14 degrés : le haut de la balustrade est donc à 2 mètres du sol. Dans les virages, la pente est de 45 degrés et le haut de la balustrade est à 5 mètres du sol. Suivant la discipline, les athlètes vont parcourir soit le bas de la piste, soit le haut, selon les épreuves.

		piste				
		Match sprint 200 m fly + match	Team Sprint	Keirin		
Sprint					< 1 min	
					< 1 km	
					65km/h < U < 80 km/h	
		Team pursuit	Omnium	Madison		
Endurance					> 4 min	
					> 4 km	
					55km/h < U < 65 km/h	

Figure 18

Différents types de courses en vélodrome.



Figure 19

On retrouve des athlètes des courses d'endurance dans le Tour de France.

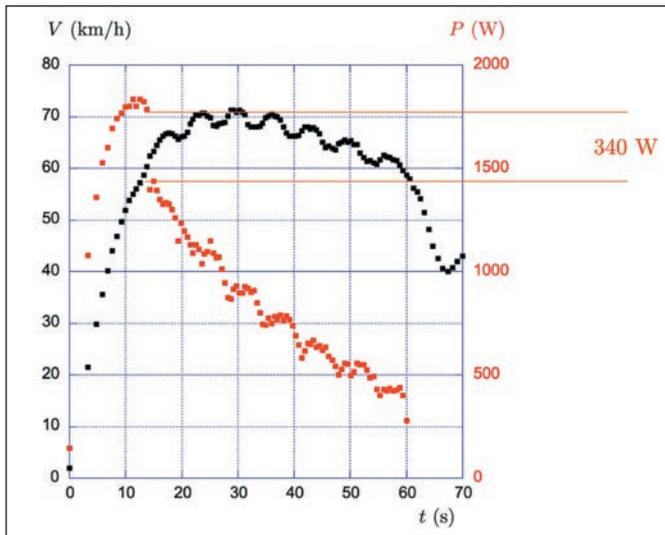


Figure 20

Vitesse du cycliste lors d'une course (la finale du « kilomètre » de Melvin Landerneau) (en noir) et puissance déployée (en rouge) en fonction du temps.

le meilleur temps est classé premier, le 32^e temps est classé 32^e. Dans les matches, le premier va affronter le 32^e; le 2^e, le 31^e, etc. Les sprinters

roulent à des vitesses caractéristiques entre 65 et 80 km/h, et ne parcourent jamais plus d'un kilomètre. La durée maximale de leurs épreuves, c'est la minute. Ce sont donc des athlètes qu'on ne voit jamais sur le Tour de France : ils font des efforts très intenses mais très courts.

Ensuite, il y a la **course de vitesse par équipe, le Keirin**. C'est une épreuve en peloton de sprint.

Dans les **courses d'endurance**, il y a trois épreuves : la **poursuite par équipe**, l'**omnium** et la **Madison**. Les athlètes sont les coureurs que vous voyez sur le Tour de France (Figure 19).

Benjamin Thomas, l'un des leaders de l'équipe française de poursuite, fait à la fois le Tour de France et les épreuves de piste. Les vitesses caractéristiques se situent entre 55 et 65 km/h. Les distances commencent à 4 kilomètres pour la poursuite et peuvent monter jusqu'à 50 kilomètres pour la Madison. Avec une distance totale de 50 kilomètres et le tour du vélodrome qui mesure 250 mètres, ça fait 200 tours de piste !

Le travail du physicien est d'observer ces athlètes pendant toutes ces différentes épreuves pour répondre aux questions des entraîneurs. Par exemple, l'une des questions principales pour les sprinters, ou même pour les endurants, est : « Quel braquet³ mettre pour la course demandée ? »

Il faut réaliser, pour bien comprendre, que les vélos utilisés pour ces épreuves n'ont pas

3. Combinaison pignon/plateaux.

de changement de vitesse et n'ont pas non plus de freins : ils sont « pignon fixe ». Ce sont des vélos très rudimentaires dans leur conception. Il y a une jauge minimale pour le poids, c'est 6,8 kilos, un minimum. À partir de là, les différentes équipes travaillent et choisissent le design. Et les questions que pose l'entraîneur sont : « Qu'est-ce que je mets comme plateau avant ? », « Qu'est-ce que je mets comme pignon arrière ? », pour une course donnée, pour un athlète donné.

La mesure décidée par le physicien commence en instrumentalisant les manivelles pour récupérer les données à la fois sur la cadence et sur la vitesse. La **Figure 20** correspond à une course de Melvin qui court le kilomètre. Il monte jusqu'à 72 km/h à partir d'un départ arrêté, puisque « le kilomètre », c'est un départ arrêté !

Les petits points dont est faite la courbe sont des moyennes sur un tour de pédale. Par ailleurs, on récupère aussi la puissance. En l'occurrence, le coureur Melvin monte jusqu'à 1700 watts. Au bout d'un moment, on voit qu'il y a une chute de 340 watts, c'est le moment où il s'assoit : il passe de danseuse à assis. Il y a une autre caractéristique, évidemment, c'est qu'il se fatigue, et donc sa puissance diminue sur le kilomètre. Elle va passer de 1700 à 400 watts à la fin du kilomètre.

Les courbes de vitesse de la **Figure 20** font apparaître des oscillations. On en compte huit, ce qu'on peut corrélérer aux tours de piste : un kilomètre, c'est quatre tours de

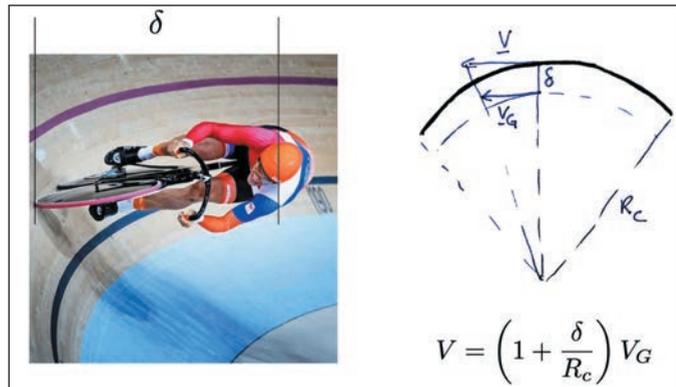


Figure 21

Physique du tournant dans les virages du vélodrome.

piste (puisque la piste fait 250 mètres), et un tour de piste, c'est deux virages. On est donc bien à huit en comptant une oscillation par virage.

Cette corrélation permet d'expliquer les oscillations : dans les virages, l'angle de piste est très relevé, si bien que le corps solide a une partie plus proche du centre de la trajectoire que les roues. C'est ce qu'on voit sur la **Figure 21**. Le centre de gravité du cycliste sur son vélo s'est écarté dans les virages d'à peu près un mètre. Le rayon de courbure du virage, c'est 20 mètres. Cela entraîne une différence de $1/20^\circ$, c'est-à-dire 5 %, sur la vitesse, ce qui est conforme à l'ordre de grandeur observé dans l'évolution des vitesses de Melvin.

Réaction supposée du lecteur de ce chapitre : on commence à comprendre un petit peu la dynamique, on voit qu'il y a des effets de virage par une équation qu'il sera possible d'adapter et d'utiliser sur des épreuves plus compliquées. Quant à nous, restons-en là et continuons sans équations.

A. L'épreuve de vitesse par équipe

La vitesse par équipe est l'une des épreuves les plus surprenantes (Figure 22). Elle se court à trois. Il ne s'agit pas d'une compétition entre les trois cyclistes, car l'objectif est de réussir le meilleur temps



Figure 22

Équipe française de vitesse par équipe.

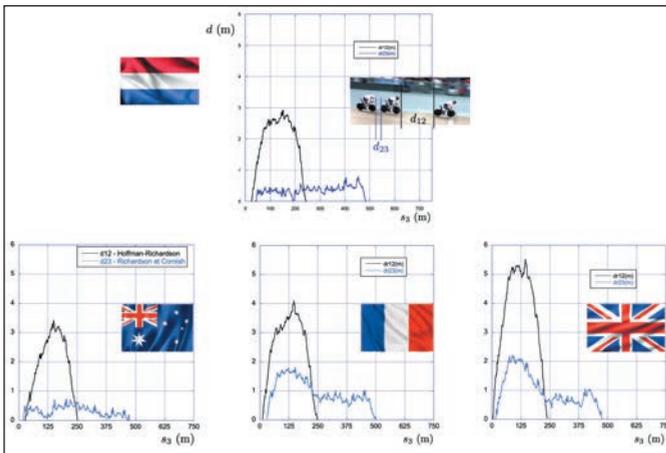


Figure 23

Graphe des distances entre les trois cyclistes en fonction de leur position dans la course pour 4 pays.

pour l'équipe, c'est-à-dire pour le premier arrivant. La stratégie adoptée par les équipes de trois cyclistes apparaît comme étonnante au départ.

Les trois coureurs de l'équipe partent tous ensemble. Le premier fait un tour en tête, puis il s'écarte. Vient ensuite le deuxième, qui le rattrape, fait un tour en tête puis s'écarte. Donc le premier fait 250 mètres, le second fait 500 mètres. Le dernier fait 750 mètres ; c'est son temps qui compte pour la compétition. Les coureurs ne sont pas autorisés à se doubler, et c'est ce qui détermine leur stratégie.

La Figure 23 analyse la course que nous venons de citer en représentant la variation des distances entre les coureurs en fonction de la distance parcourue. La distance 1-2 entre le 1 et le 2 est tracée en fonction de la position du 3, qui va faire ses 750 mètres. Elle augmente jusqu'aux 125 mètres, qui correspondent au demi-tour de piste, puis se referme. Et 2 et 3 vont rester à peu près à une distance de roue l'un de l'autre. Cette stratégie va être la même, quelle que soit la nation concernée.

Cette stratégie « étonnante » a été délibérément construite, introduite aux JO de Sydney en l'an 2000. Dans les stratégies antérieures, les trois coureurs « se suivaient » de façon à se protéger des contraintes aérodynamiques. Mais dans cette stratégie, au moment du passage de relais, soit au bout d'un tour, la vitesse du deuxième est la même que celle du premier. Et comme on ne peut se doubler avant le passage de la ligne, on ne peut construire

aucun gain de vitesse. Cette stratégie consistant à se suivre a donc été abandonnée et remplacée par la stratégie représentée sur la **Figure 24** qui offre l'avantage d'obtenir une plus grande vitesse pour le trio.

Sur la **Figure 24**, on voit Timmy Gillion en démarreur, avec la courbe noire, qui représente la vitesse en fonction du temps ; les barres, ce sont les tours. On finit le premier tour (barre noire), on finit le deuxième tour (barre bleue), on finit le troisième tour (barre rouge). Au moment du passage de relais, la vitesse de Timmy Gillion est de 6 km/h de moins que celles de Sébastien Vigier et de Melvin Landerneau. La stratégie nouvelle est une façon de ne pas se doubler, mais d'avoir tout de même une vitesse du relayeur plus grande que celle du démarreur.

Essayons de mettre ce raisonnement en modèle physique. À $t = 0$, la vitesse du démarreur est nulle, c'est un départ arrêté, donc elle va monter vers une valeur maximale. On peut définir le temps que va mettre le démarreur pour arriver au bout de 250 mètres. L'aire sous la courbe, c'est celle que vous obtenez quand vous intégrez la vitesse par rapport au temps, donc la distance parcourue, et donc exactement 250 mètres.

Lorsque le relais est parfait, la distance parcourue par le deuxième sera la même : deux parcours de 250 mètres. Donc l'aire sous la courbe du deuxième doit être aussi de 250 mètres. Mais le but de l'épreuve veut que la vitesse du deuxième au moment du passage soit plus grande que

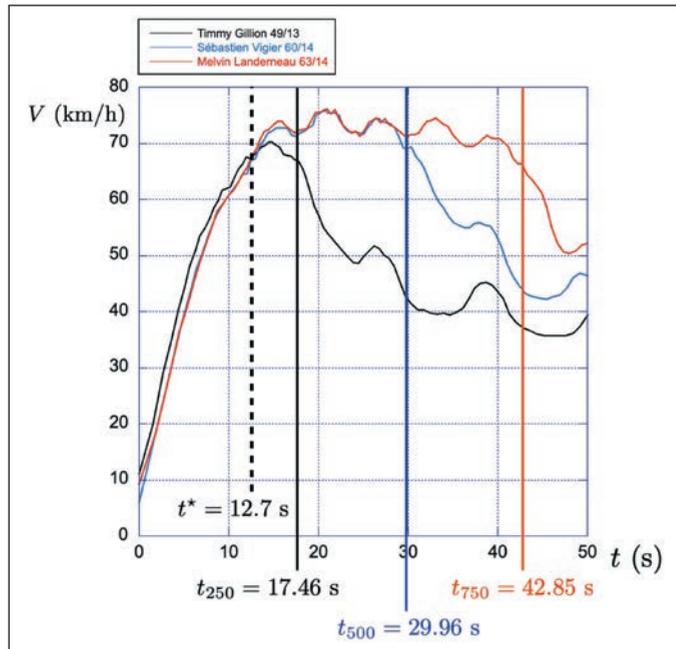


Figure 24

Évolution des vitesses des trois Français lors d'une course de vitesse par équipe.

la vitesse du premier, mais que l'aire sous sa courbe soit la même. On n'a donc pas le choix : il faut que les deux courbes se coupent. Il y a donc une partie de la course où V_2 sera plus petit que V_1 , c'est-à-dire que le relayeur sera en retard sur le démarreur, puis la suivante où il va le rattraper (**Figure 25**). C'est ce qu'on appelle le « **sprint décollé** ».

Cette invention de nouvelle stratégie est entièrement à mettre au crédit des sportifs. En revanche, le physicien peut dégager la loi à laquelle la course obéit et l'optimiser. Et il peut souvent rassurer l'athlète en lui confirmant : « Ce que vous faites, c'est vraiment l'optimum, c'est exactement ça qu'il faut faire. »

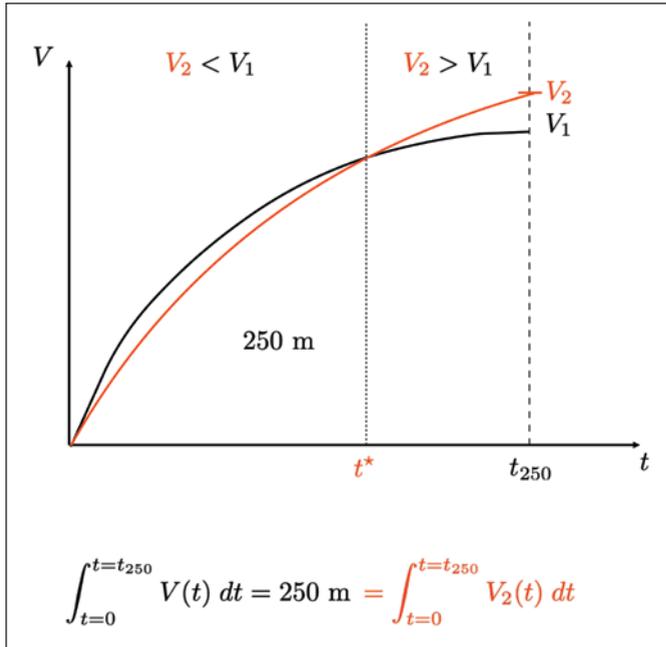


Figure 25

Évolution des vitesses d'un relayeur (V_2 , en 2^e position) et d'un démarreur (V_1 , en 1^{re} position) lors d'une course de vitesse par équipe.

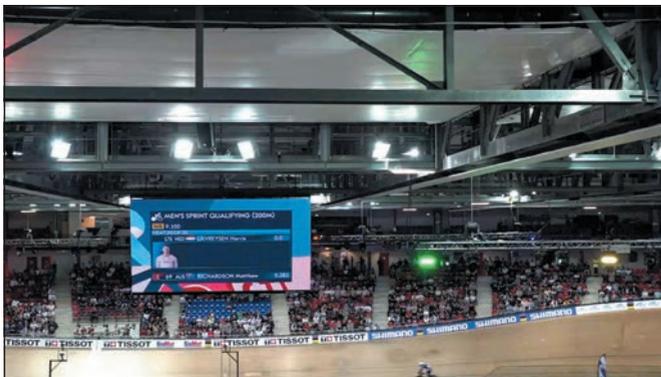


Figure 26

Le champion olympique Harrie Lavreysen lors des qualifications aux JO.

B. L'épreuve de 200 mètres lancés

Examinons le « 200 mètres lancés ». Les athlètes courent 1 km ; seuls les 200 derniers mètres sont chronométrés. On doit donc rentrer le plus vite possible, et pour cela utiliser la hauteur de chute de la piste.

Pour le préparer, l'athlète est sur la partie haute, donc à la balustrade. Puis il plonge : il est à 82 km/heure. Dernier virage, et quand il passe cette ligne, c'est le début du chrono. C'est un départ lancé. Puis il roule, en veillant à ne pas se faire éjecter dans le deuxième virage, et il franchit la ligne. Dans le cas de Harrie Lavreysen, la vitesse moyenne sur l'ensemble des 200 mètres était de 78 km/heure. Florian Rousseau, qui a la charge de l'optimisation de la performance, demande au physicien d'utiliser ses connaissances, et notamment de caractériser la position de Harrie Lavreysen par rapport à la concurrence. C'était son injonction à Glasgow en 2023 (Figure 26). La première idée, bien sûr, c'est de récupérer des données.

Le résultat des mesures de position et de vitesse est reporté sur la Figure 27 pour les cinq virages de préparation avant la plongée finale. Ces virages, c'est le parcours qui part de la balustrade ; de là, il plonge et fait son 200 mètres. Chaque plongée du cycliste du haut de la piste (environ 5 mètres) vers le bas (environ 1,8 mètre) lui fait gagner de la vitesse. Celle-ci atteint sa valeur maximale au début de la zone rouge qui marque le début du décompte du temps de la performance.

En noir, c'est la hauteur mesurée sur l'axe de gauche tracée en fonction du temps. En rouge, c'est l'énergie évaluée pour Harrie Lavreysen (qui dépend donc de sa vitesse). Deux phases sont observées : une phase lente qui se fait à peu près à 238 watts et une phase rapide qui contient le 200 mètres et qui se fait aux alentours de 1400 watts sur 30 secondes d'effort.

Ce qui a surpris l'équipe de physiciens, c'est de le voir monter quatre fois. On comprend que l'athlète utilise la hauteur de la chute finale pour avoir une vitesse importante, mais pourquoi le faire quatre fois ?

Cet exemple très classique permet de le comprendre.

Prenons deux particules : l'une qui se déplace sur une piste toute droite et l'autre qui prend une bosse (**Figure 28**).

Dans un premier exemple, on suppose l'absence de friction. L'énergie mécanique va alors se conserver. La bille franchissant la bosse est allée moins vite au sommet puisqu'elle est en train de stocker de l'énergie sous forme potentielle. À l'extrémité du parcours, elle a restitué cette énergie et accroît sa vitesse qui est redevenue égale $V_2(0)$ grâce à l'absence de friction.

En présence d'un facteur de friction qui croît avec la vitesse, la même expérience donnera une vitesse supérieure à la bille qui a franchi une bosse, car elle aura moins perdu d'énergie de friction.

C'est tout le principe du gain de vitesse de Harrie Lavreysen.

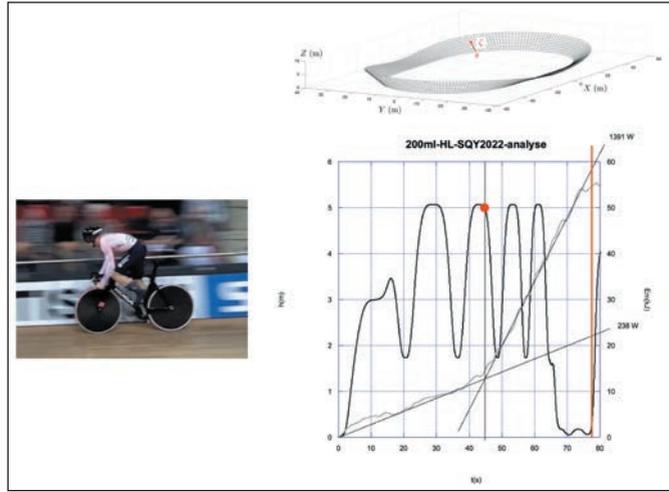


Figure 27

Évolution de la hauteur et de la vitesse du cycliste Harrie Lavreysen avant de plonger lors d'une épreuve de 200 mètres lancés. En noir, sa hauteur sur la piste latérale du vélodrome. En rouge, sa vitesse mesurée sur le capteur. La mesure du temps de la performance intervient à la fin de la zone rouge qui mesure 200 mètres.

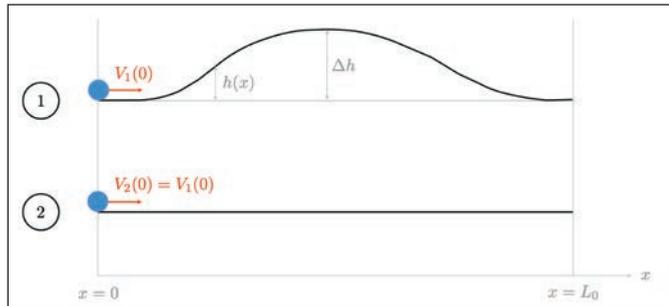


Figure 28

Simulation de la trajectoire et des paramètres dynamiques d'une particule suivant 2 trajectoires différentes.

Conclusion

Ce dernier exemple du 200 mètres lancés de Harrie Lavreysen symbolise le rôle et la méthode de travail des physiciens avec les sportifs.

En s'appuyant sur les mesures relevées en direct, le physicien peut construire des modèles complexes puis modéliser toute situation prometteuse, varier les conditions des épreuves, sélectionner des capteurs mieux appropriés. En fin de compte, il peut fournir à l'athlète les conditions d'un optimum pour son épreuve. Mais, en variant les modèles, il peut également imaginer avec les sportifs des techniques originales pour les épreuves classiques.

Toutefois, n'oublions pas la base : ce sont l'imagination et l'inventivité des sportifs qui, au cours des décennies, ont fait des merveilles pour améliorer les performances. Aller plus loin reste possible en leur ouvrant les merveilleuses possibilités de la physique et de la chimie et des moyens d'observation numériques.