

Mirages en natation

Étude des trajectoires de départ

Rémi Carmigniani⁽¹⁾ (remi.carmigniani@enpc.fr), **Charlie Pretot**⁽¹⁾, **Thomas Brunel**⁽¹⁾, **Christophe Clanet**⁽²⁾, **Michel Chrétien**⁽³⁾ et **Robin Pla**⁽³⁾

(1) Laboratoire d'Hydraulique Saint-Venant (École nationale des Ponts et Chaussées, Institut polytechnique de Paris, EDF R&D), 6 quai Watier, 78400 Chatou

(2) LadHyX, (UMR 7646 CNRS), École polytechnique, Route de Saclay, 91128 Palaiseau Cedex

(3) Fédération Française de Natation, 104 rue Martre, 92110 Clichy

La natation est un sport de course au même titre que la course à pied, l'aviron ou encore le cyclisme. L'objectif peut paraître simple : couvrir une distance donnée le plus rapidement possible.

Cependant, elle se distingue par ses phases de départs et de virages. En effet, dans les courses avec départ arrêté, les coureurs, rameurs, cyclistes accélèrent pour atteindre une vitesse maximale et luttent ensuite pour s'y maintenir, malgré la fatigue. En natation, dans les disciplines de crawl, de papillon et de brasse, les nageurs s'élancent d'un plot et plongent dans l'eau à une vitesse près de trois fois supérieure à leur vitesse de nage. Plus quantitativement, un nageur atteint typiquement 5 m/s à la sortie du plot, entre dans l'eau à 6 m/s, mais ne nage « qu'à » 2,2-2,3 m/s pour les meilleurs ! Au virage, il pousse au mur et peut atteindre près de 3,5 m/s. Il faut profiter le plus longtemps possible de ces fortes vitesses. Pour ça, les nageurs ont le droit de parcourir jusqu'à 15 mètres sous l'eau. Pourquoi nager sous l'eau et rallonger le chemin à parcourir ?

À l'aide de caméras et d'intelligence artificielle, nous étudions ces phases clefs et caractérisons la trajectoire des nageurs. Un modèle physique, prenant en compte les résistances à l'avancement, ainsi que les différents modes de propulsion (ondulation et nage) est proposé.

En course de natation, les nageurs s'affrontent dans une piscine de 50 mètres (voir l'encadré 1 sur les bassins, p. 13) et peuvent parcourir plusieurs longueurs. La course commence par un « départ ». Les nageurs s'élancent du bord du bassin et « plongent » dans l'eau. Au bout du bassin, les nageurs doivent toucher le mur pour repartir dans l'autre sens. Ils en profitent pour pousser sur le mur avant de repartir. On parle de « virage ».

Les nageurs sont autorisés à parcourir jusqu'à 15 mètres sous l'eau après le départ et les virages [1]. Dans le jargon de la natation, les phases où

les nageurs sont sous l'eau sont appelées « coulées ». La distance maximale autorisée a été instaurée d'abord pour le dos à la suite de la finale du 100 m dos aux Jeux de Séoul en 1988, où les deux premiers avaient parcouru plus de 30 m sous l'eau au départ [2]. Elle a été étendue au papillon et au crawl, après les 25 m de coulée et le record du monde de Denis Pankratov lors de la finale du 100 m papillon aux Jeux d'Atlanta en 1996 [3].

Ces phases sont décisives, notamment pour les courses de 50 et 100 mètres : les *sprints*. Le départ et les virages permettent aux nageurs de démarrer leurs courses avec un "boost" de

vitesse. En effet, au départ les nageurs peuvent atteindre plus de 5 m/s, et près de 3,5 m/s lors d'un virage. Ces vitesses sont bien supérieures à leur vitesse de nage (voir l'encart 2 sur les techniques de nages et les vitesses en natation, p. 14), qui ne dépasse pas les 2,3 m/s pour les meilleurs *sprinters*. Tout l'enjeu est donc de profiter le plus longtemps possible de ces fortes vitesses. Les nageurs ne pourront jamais les atteindre en nageant. Alors, comment faire ? Pourquoi nager sous l'eau ? Allons-nous plus vite sous l'eau qu'à la surface ? Existe-t-il une stratégie unique de coulée ?

>>>



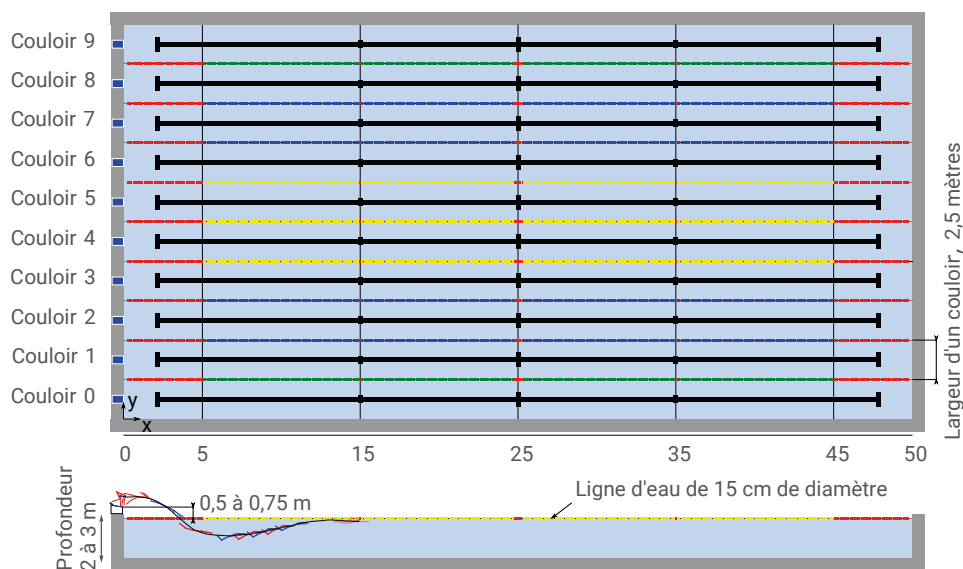
Léon Marchand (au premier plan) nageant lors de la demi-finale du papillon 200 mètres hommes à La Défense Arena pendant les Jeux Olympiques de Paris 2024.

➤ AVANT DE PLONGER DANS LE GRAND BAIN

ENCADRÉ 1

La natation fait partie des sports olympiques depuis la première édition des Jeux modernes en 1896. Les épreuves se sont disputées d'abord en mer puis dans des bassins de 100 mètres de long, avant de converger vers des bassins de 50 mètres. La première fois, c'était à Paris en 1924 !

Un bassin olympique moderne (fig. A) fait 50 mètres de long et 25 mètres de large. Les nageurs sont seuls dans des couloirs de 2,5 m de large, séparés par des lignes d'eau composées de flotteurs de 15 cm de diamètre. Lors des Jeux, les deux couloirs extérieurs (couloir 0 et couloir 9) sont laissés vides pour limiter les effets de bord (réflexion des vagues sur le mur...) qui pourraient pénaliser les nageurs de ces couloirs. Le bassin fait entre 2 et 3 m de profondeur. Les lignes présentent toutes des bouées rouges et, selon les couloirs, des bouées de couleurs vertes, bleues ou jaunes. Les couloirs centraux avec les lignes jaunes sont réservés aux nageurs ayant réalisé les meilleurs temps aux phases de qualification.



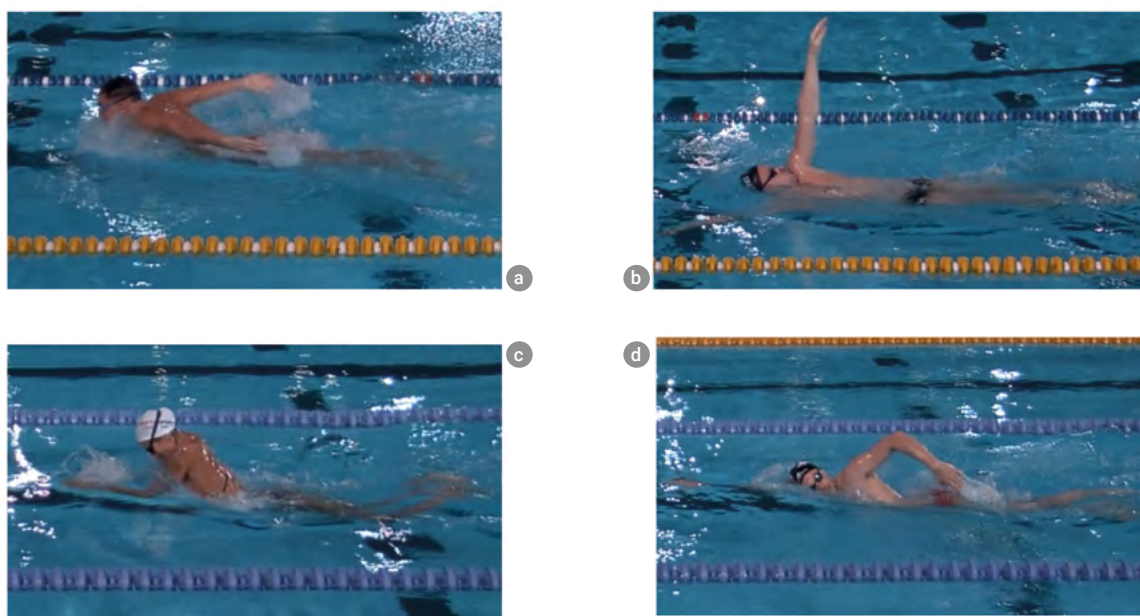
A. Le bassin olympique et ses dimensions.

Dans les cinq premiers mètres les lignes sont rouges. Elles redeviennent brièvement rouges au niveau des quinze mètres, pour que les juges puissent repérer rapidement les nageurs dépassant cette limite réglementaire pour les phases de coulées. Une zone rouge plus longue marque également le milieu du bassin. Vous pouvez ainsi facilement vous repérer dans le bassin !

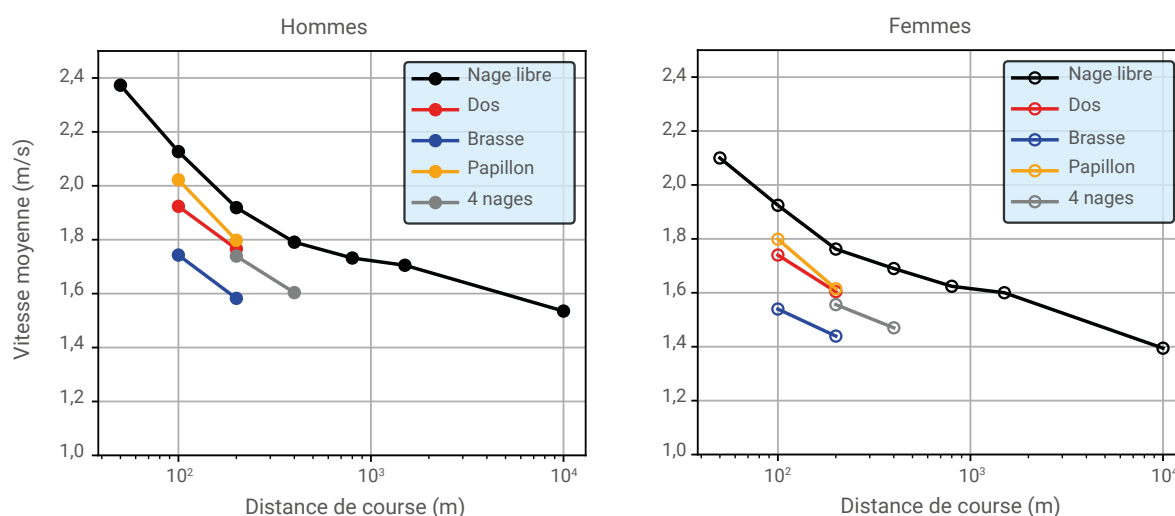
Pour les Jeux de Paris 2024, le programme comprenait 35 courses en bassin (17 courses pour les hommes et les femmes et une course par équipe mixte) et 2 courses en eau libre (10 km dans la Seine). Il y avait trois types d'épreuves individuelles : les courses à technique de nage imposée de 100 m et 200 m en dos, brasse et papillon (12 épreuves), les courses « de nage libre » où les nageurs n'ont pas de contrainte technique outre la distance de coulée (12 épreuves) et les épreuves de 200 m et 400 m 4-nages où les nageurs doivent parcourir un quart de la distance dans chacune des quatre nages, dans l'ordre papillon, dos, brasse et crawl (4 épreuves).

La figure B illustre les différentes techniques de nage olympique. Les courses en « nage libre » sont disputées sur des distances de 50 à 1500 mètres en bassin et 10 km en eau libre. Pour ces courses, tous les nageurs choisissent de nager en crawl ! Cette technique de nage semble être aujourd'hui la plus rapide (utilisée pour les *sprints*) et la plus efficace (utilisée pour les courses longues) par rapport aux trois autres styles (papillon, dos et brasse).

La figure C montre la vitesse moyenne sur les courses individuelles olympiques pour les hommes et les femmes lors des Jeux de Tokyo 2021. Le crawl est de loin la nage la plus rapide. Le papillon est plus rapide que le dos sur 100 m mais devient comparable sur le 200 m. La brasse est bien moins rapide que les trois autres nages.



B. Les nages olympiques. (a) Papillon ; (b) dos ; (c) brasse ; (d) crawl.



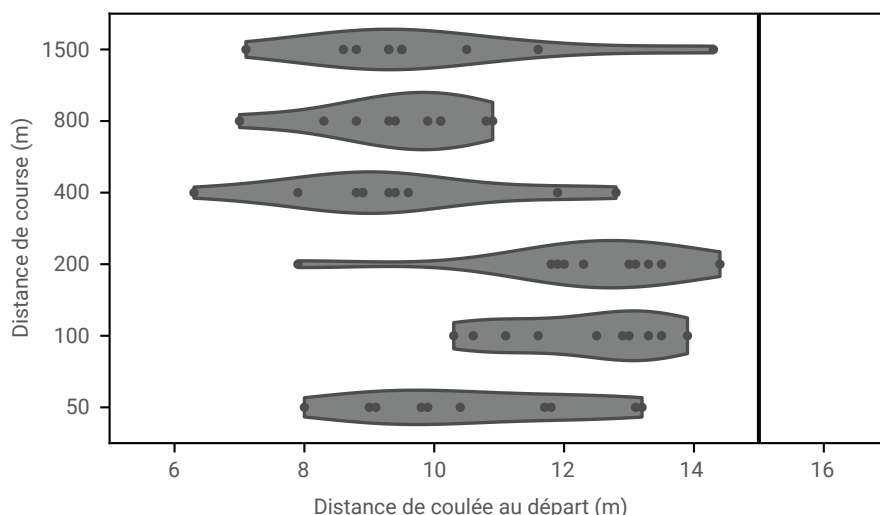
C. Vitesse moyenne de nage des champions et championnes olympiques de Tokyo 2021 en course de natation dans les différentes nages.

>>>

Les distances de coulées en compétition

Pour commencer, regardons ce que font aujourd'hui les meilleurs nageurs après un départ pour les différentes distances de courses en nage libre. La figure 1 montre la distance parcourue sous l'eau au départ pour les courses de nage libre des dix meilleurs athlètes mondiaux suivis par le service optimisation de la Fédération Française de Natation. Cette distance est mesurée à la tête du nageur à la fin de son premier coup de bras. La distance présentée sur la figure est corrigée de 1,10 m pour représenter la position approximative de la sortie de la tête du nageur. Chaque point représente un des dix nageurs et le contour la distribution sur ces dix points. Le trait vertical montre la limite réglementaire des 15 mètres.

La distance de coulée est très dispersée pour la course de *sprint* pur du 50 mètres. Elle va de 8 m à près de 13 m. Aucun des dix meilleurs *sprinters* ne fait 15 m de coulée. La distance augmente et la distribution semble moins dispersée pour les courses de 100 m et 200 m. Elle se réduit et se disperse pour les courses plus longues. Il semble y avoir trois régimes. On y voit presque les signatures des différentes sources d'énergie du corps humain.

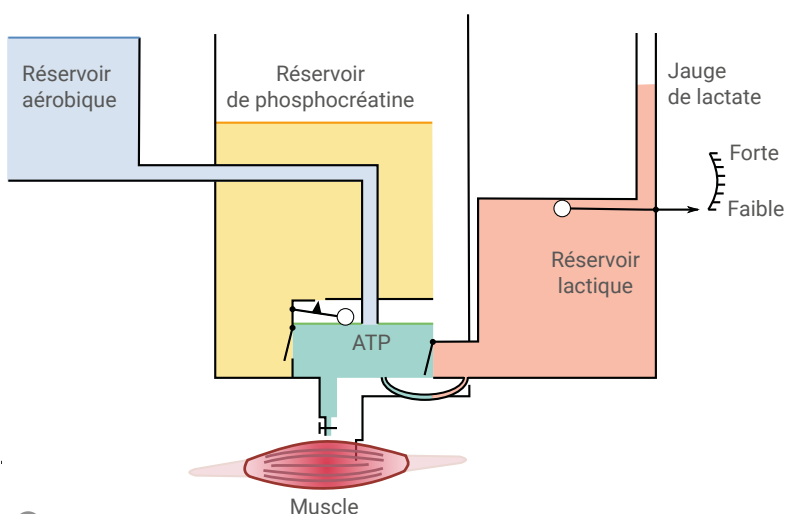
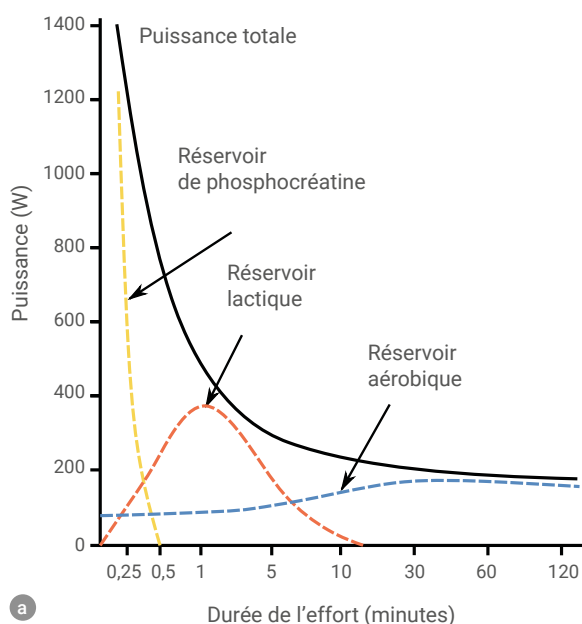


1. Distances de coulées des dix meilleurs athlètes mondiaux suivis par la Fédération Française de Natation pour les différentes distances de courses de nage libre. Chaque point correspond à un des dix nageurs et chaque ligne à une des six distances de course, de la plus courte (en bas) à la plus longue (en haut). La distribution est représentée par les zones en gris.

Pour générer la puissance nécessaire à la performance sportive, le corps humain utilise une seule molécule : l'adénosine triphosphate ou ATP. Les muscles du corps en ont tous une toute petite quantité directement disponible au niveau des muscles (réservoir vert sur la figure 2b). En comparaison, elle est négligeable à la demande des muscles pendant un effort sportif. Il faut donc la renouveler.

Pour cela, le corps dispose de trois grands « réservoirs » d'énergie. La figure 2a montre schématiquement l'évolution de la puissance moyenne en fonction de la durée d'un effort maximal et les sources d'énergie qui entrent en jeu. La figure 2b représente, à l'aide d'un modèle hydraulique, les trois réservoirs d'énergie qui alimentent les muscles, comme proposé par Morton [4].

>>>



2. L'énergie dans le corps humain. (a) Évolution schématique de la puissance pour différentes durées d'effort (ou courbe d'Howald). (b) Les réservoirs d'énergie dans le corps humain (modèle hydraulique inspiré de Morton [4]).

>>>

Le premier à entrer en jeu est le réservoir de phosphocréatine (en jaune sur la figure 2b). C'est une source d'énergie directement disponible au niveau des muscles, mais qui ne permet de générer de la puissance que pour un court moment, de l'ordre de 30 secondes. C'est le régime du *sprint* pur, comme le 50 m qui ne dure que 21 à 24 secondes. L'énergie n'est pas limitante (les autres réservoirs commencent à peine à être mis en service), mais la puissance oui ! Il faut absolument optimiser son geste pour aller le plus vite, et tous les détails comptent. On comprend alors que la trajectoire du départ ne sera pas unique. Elle va dépendre des caractéristiques du nageur. C'est ce que nous allons discuter dans la suite.

Le deuxième réservoir correspond au réservoir dit « lactique » (en orange sur la figure 2b). Là, le corps humain va consommer du sucre directement sans apport d'oxygène et générer de l'acide lactique ou « lactate », qui sera visible dans le sang en signature de l'utilisation de ce réservoir. Cette source d'énergie domine pour les efforts plus longs, allant jusqu'à quelques minutes. C'est le cas des courses lactiques de 100 et 200 m, qui durent de 46 secondes à 2 minutes. Pour ces courses, allonger les coulées pourrait être une façon d'économiser un ou deux cycles de bras, décisifs pour la fin de course !

Le troisième réservoir est le réservoir dit « aérobique » (en bleu sur la figure 2b). Là, le corps humain utilise l'oxygène pour « brûler » les sucres (glucose et lipides). C'est la source d'énergie la plus stable, et elle est

utilisée pour les courses longues. Dans ce cas, être le plus rapide au départ n'est certainement pas le plus important. Il faut s'économiser et bien s'oxygéner, ce qui est difficile sous l'eau...

La distance de coulée dépend donc de la distance de course et du nageur. Il faut faire du sur-mesure.

Des caméras pour disséquer les phases de départ

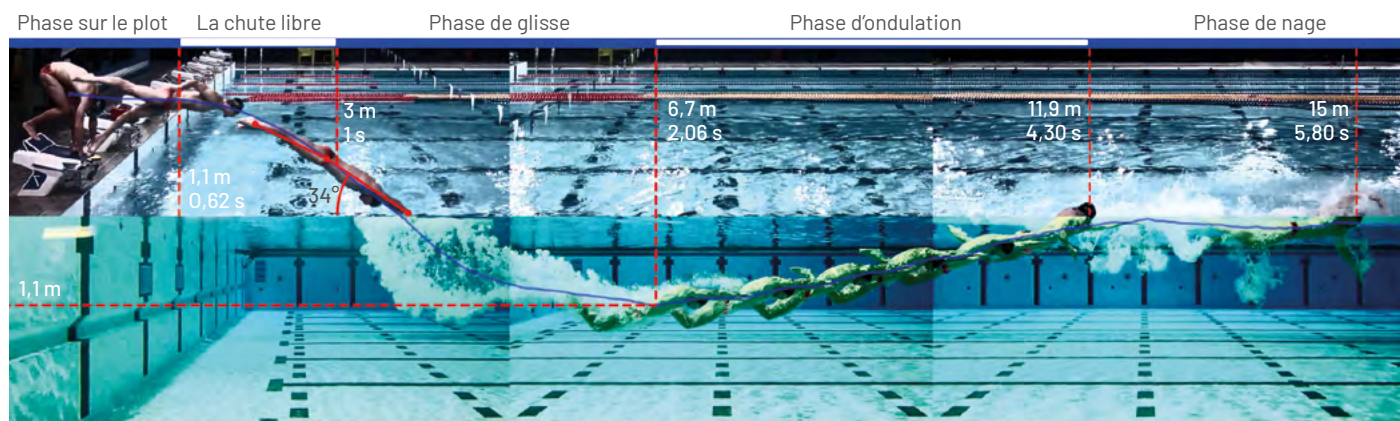
Pour étudier ces phases de course, il nous faut d'abord pouvoir les observer. Nous nous rendons donc à la piscine de l'INSEP, la fabrique des champions français (située dans le bois de Vincennes à Paris). Ce bassin est équipé de vingt caméras : dix caméras sous-marines et dix caméras aériennes espacées de 5 mètres. Ces caméras sont calibrées en 3D : on corrige les effets de distorsion, leurs focales, et on mesure leurs positions dans l'espace [5]. Ensuite, les images des différentes caméras sont fusionnées afin d'obtenir une vue panoramique du bassin passant par le centre de la ligne d'eau et permettant de voir évoluer le nageur hors de l'eau, sous l'eau et à la surface.

On peut déjà observer en vue panoramique le départ du nageur (fig. 3). Grâce à la calibration des caméras, on peut également mesurer la position du nageur, l'amplitude de ses mouvements et en déduire sa vitesse (fig. 4). On complète ainsi l'œil expert de l'entraîneur par des mesures quantitatives. Pour rendre des résultats rapidement, une intelligence artificielle est entraînée à suivre le nageur et à annoter rapidement les

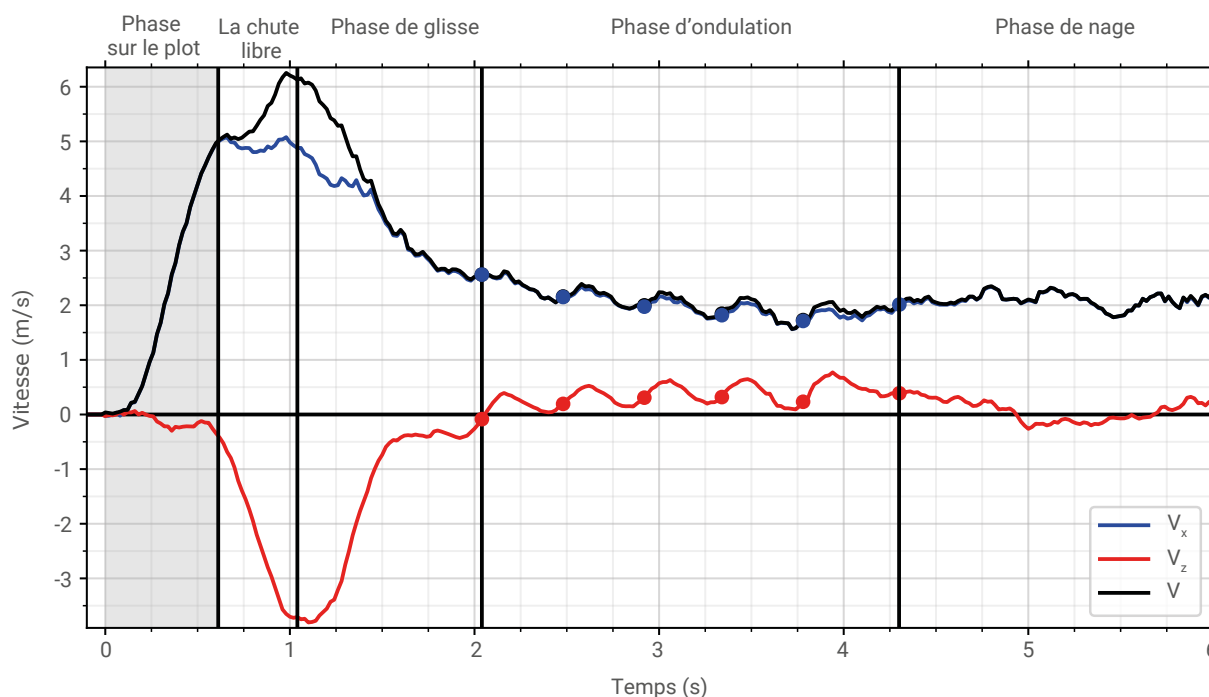
vidéos. On peut ainsi faire des retours en quelques minutes au bord du bassin et rendre cet outil compatible avec l'entraînement des nageurs français.

Plus précisément, la figure 3 montre une vue panoramique d'un départ en natation. Chaque image du nageur représente un instant remarquable du départ [6] : la position du nageur sur le plot, le décollage du plot, le début de l'entrée dans l'eau, les différentes ondulations (ce mouvement qui rappelle la nage des dauphins), la sortie de l'eau et le passage de la ligne des 15 mètres. Le départ peut ainsi être découpé en cinq phases : une phase sur le plot, une phase de chute, une phase de glisse, une phase d'ondulation et enfin une phase de nage. Il faut noter que sous l'eau, le nageur ne fait pas de battements de jambes et préfère utiliser un mouvement d'ondulation, pieds joints.

L'évolution de la vitesse du nageur pendant ce départ est tracée sur la figure 4. Après le signal de départ, le nageur prend typiquement 0,1 à 0,2 seconde pour réagir et s'élancer. Il sort du plot après 0,60 seconde et sa vitesse, principalement horizontale à ce moment, atteint de l'ordre de 5 m/s. Cette première phase est grisée sur la figure 4. Le nageur va ensuite chuter pendant 0,4 s avant d'entrer dans l'eau. Pendant cette phase, sa vitesse horizontale (courbe bleue) n'évolue pas et sa vitesse verticale (courbe rouge) croît quasi linéairement. Sa vitesse augmente donc pendant cette phase pour atteindre plus de 6 m/s à l'entrée dans l'eau. Une fois dans l'eau, le nageur ne commence pas tout de suite à nager. Il va se laisser glisser



3. Les phases d'un départ de natation.



4. Évolution de la vitesse pendant un départ. Les courbes noire, rouge et bleue représentent respectivement la norme de la vitesse et les vitesses verticale et horizontale. Les traits verticaux délimitent les différentes phases du départ. Les points représentent les ondulations.

tout en se courbant. Il s'enfonce sous l'eau jusqu'à une profondeur d'environ 1,1 m. Sa vitesse chute pendant cette phase. Il entame ensuite une phase de remontée en faisant des ondulations. Les instants où ses jambes sont les plus pliées sont montrés sur la figure 3 et sont marqués par des points sur la figure 4. La première ondulation commence à une vitesse de 2,5 m/s. La « coulée » s'achève lorsque la tête du nageur perce la surface.

Se posent alors quatre questions : nage-t-on plus vite sous l'eau ? Pourquoi attendre avant de commencer les ondulations ? À quelle profondeur faut-il descendre pour être le plus rapide ? Quelle est la distance de coulée optimale pour un nageur ?

Vitesse de nage et vitesse d'ondulation : nage-t-on plus vite sous l'eau ?

La réponse dépend du nageur et de la nage. Pour cela, nous avons demandé à des nageurs (hommes et femmes) de niveau national et international de faire des *sprints* de vingt mètres en partant sans pousser au mur, en ondulation et dans leur nage de spécialité. On cherche ainsi à mesurer leur vitesse pure sans l'aide du mur ou du départ. La figure 5 montre la vitesse maximale en ondulation, v_{ond} ,

en fonction de la vitesse maximale de nage de surface v_{surf} , pour ces nageurs. Chaque point correspond à un nageur et la couleur indique la spécialité.

La ligne en tirets montre l'égalité entre ces deux vitesses. Quand on est au-dessus de cette ligne, on nage plus vite sous l'eau, et, en-dessous, plus vite à la surface. On voit qu'en crawl, la plupart des nageurs nagent bien plus vite à la surface. Une seule nageuse nage aussi vite sous l'eau qu'à la surface dans cette nage. On note aussi qu'en dos, nos quatre nageurs nagent aussi vite ou plus vite sous l'eau qu'à la surface. En papillon, il y a un peu plus de différences, mais certains sont plus rapides sous l'eau. Notre échantillon est petit, mais on comprend pourquoi, historiquement, on a d'abord vu des coulées longues en dos et papillon. Les nageurs peuvent en effet être plus rapides dans ces nages sous l'eau en nageant en ondulation. En crawl, il est plus courant d'être plus rapide à la surface. C'est encore une fois bien illustré dans les performances des dix meilleurs mondiaux dans la figure 1 (p. 15). Les nageurs de 50 m ne poussent pas leur coulée aussi loin que les nageurs de 100 m ou 200 m (des courses où la vitesse en surface est moins rapide).

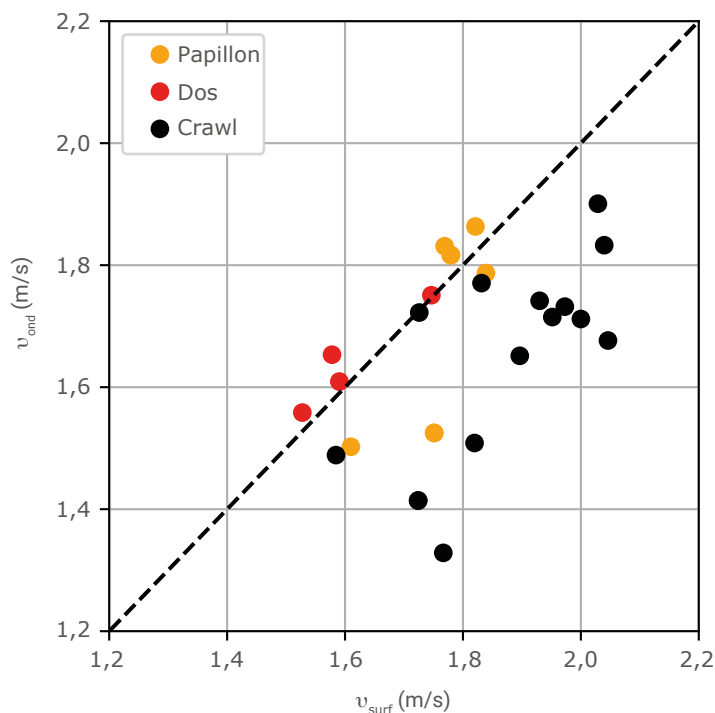
La vitesse d'activation, ou quand commencer les ondulations ?

Contrairement à notre départ arrêté pour mesurer la vitesse maximale des nageurs, un nageur commence sa course avec une vitesse bien supérieure à sa vitesse de nage. Comment profiter le plus longtemps de ces fortes vitesses ? Étonnamment, il faut attendre, rester « passif » bien gainé en flèche avant de chercher à se propulser sous l'eau et faire des ondulations. Ce paradoxe peut se comprendre facilement sur un cas à une dimension. Le nageur entre dans l'eau avec une vitesse de l'ordre de 6 m/s. Il peut choisir de se laisser glisser et dans ce cas sa vitesse v va évoluer en suivant une équation de la forme :

$$(m + m_a) dv/dt = -1/2 \rho (SC_D)_p v^2 \quad (1),$$

où m est la masse du nageur, m_a correspond à une masse additionnelle d'eau transportée par le nageur et est estimée à 25 % de la masse du nageur [7], v sa vitesse, $(SC_D)_p$ est la surface de trainée sur laquelle les forces des résistances s'appliquent. L'indice « p » souligne ici le caractère passif du nageur. C'est la seconde loi de Newton. En passif, loin de la surface de l'eau, cette surface de trainée est une constante, de l'ordre de 0,04 m². Elle va

>>>



5. Vitesse en ondulation en fonction de la vitesse de nage en surface pour le papillon, le dos et le crawl. La ligne en tirets correspond à $v_{ond} = v_{surf}$.

>>>

bien sûr dépendre du nageur et il faut la mesurer. Dans cette phase, le nageur ne fait que perdre de la vitesse.

Le nageur peut aussi faire le choix de se propulser sous l'eau. Il choisira alors de faire des ondulations. Dans ce cas, il va avoir une force de propulsion, mais également une résistance plus

importante du fait de la déformation de son corps. On parle alors de résistance « active ». Sa vitesse évolue avec une équation de la forme :

$$(m + m_a) \frac{dv}{dt} = F_{ond} - \frac{1}{2} \rho (SC_D)_{ond} v^2 \quad (2),$$

où F_{ond} est la force de propulsion du nageur en ondulation et $(SC_D)_{ond}$ sa

surface de trainée en ondulation. Cette surface est à peu près deux fois supérieure à la surface passive. La vitesse maximale que peut maintenir le nageur en ondulation est donnée par :

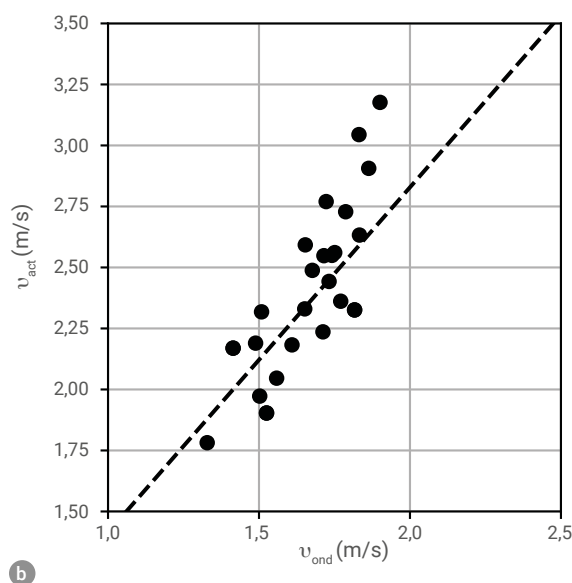
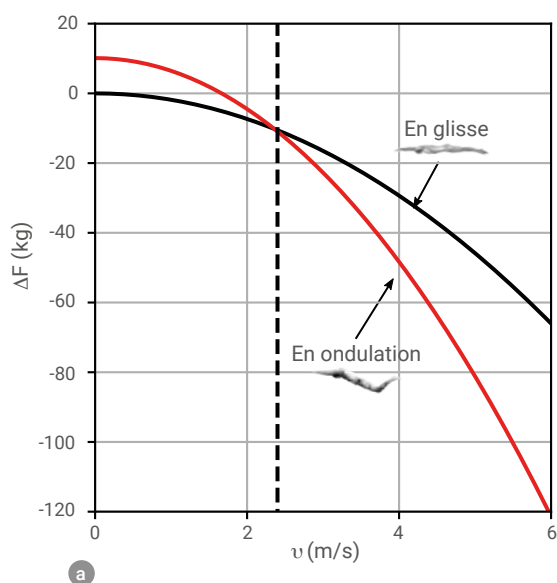
$$v_{ond} = [2 F_{ond} / \rho (SC_D)_{ond}]^{1/2} \quad (3).$$

Le nageur cherchant à maintenir le plus longtemps son *boost* de vitesse choisira la technique (entre passif et actif) lui permettant de décélérer le moins vite possible, comme illustré sur la figure 6a. Il ne commencera à onduler que lorsque sa vitesse deviendra inférieure à une vitesse critique, qu'on appellera vitesse d'activation :

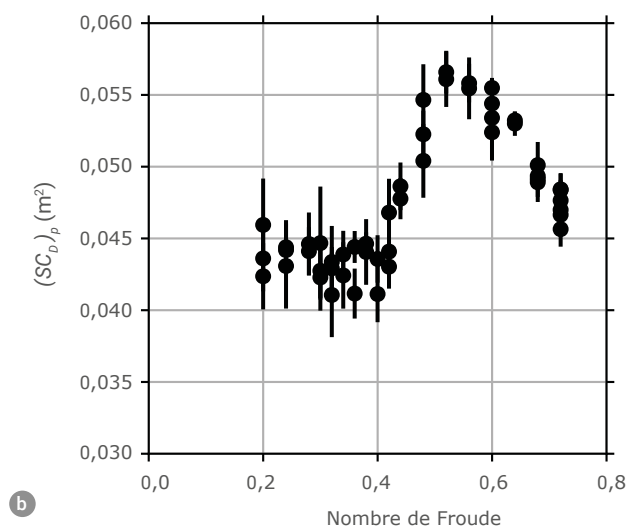
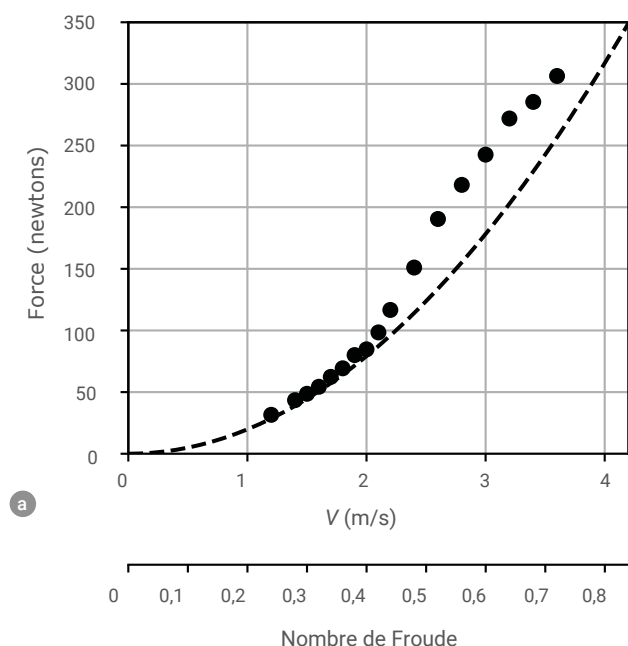
$$v_{act} = v_{ond} [K/(K-1)]^{1/2} \quad (4),$$

où $K = (SC_D)_{ond} / (SC_D)_p$ est le rapport entre les surfaces de trainée en ondulation et en passif. La figure 6b montre la vitesse d'activation théorique en fonction de la vitesse en ondulation du nageur. On voit que les nageurs les moins rapides suivent une loi proche de $K = 2$, et que les meilleurs nageurs en ondulation ont tendance à avoir des vitesses d'activation supérieures, signe d'une plus petite résistance relative en ondulation et certainement d'une meilleure technique.

On comprend ainsi pourquoi les nageurs se laissent glisser à l'entrée dans l'eau. Pour les nageurs entrant dans l'eau avec des vitesses de l'ordre de 6 m/s, cette phase de glisse est



6. Vitesse d'activation des ondulations. (a) Résultante des forces sur un nageur en glisse passive (courbe noire) et en ondulation active (courbe rouge). (b) Vitesse d'activation en fonction de la vitesse en ondulation. La ligne en tirets représente l'équation (4) avec $K = 2$.



7. Effet de la vitesse (ou du nombre de Froude) sur la trainée à la surface.

(a) Force pour tracter le nageur à une vitesse V donnée. La courbe en tirets représente une force en V^2 . Le nombre de Froude équivalent est représenté sous l'axe horizontal.

(b) Surface de trainée effective déduite en fonction du nombre de Froude.

notable. En revanche, lors d'un virage, les nageurs n'atteignent plus des vitesses aussi importantes. Ils poussent au mur et repartent avec des vitesses proches de 3,5 m/s. On s'approche des vitesses d'activation pour les meilleurs, qui auront alors intérêt à déclencher très rapidement leurs ondulations.

La trainée de vague : plonger, mais pas trop !

Quand un corps, comme celui d'un nageur, se déplace au voisinage d'une interface comme celle entre l'eau et l'air, il génère des vagues quiradient de l'énergie vers l'infini, entraînant une résistance supplémentaire : on parle de « trainée de vague ». Cette force dépend du rapport entre la vitesse de nage et la vitesse caractéristique des ondes générées. Les bassins olympiques étant suffisamment profonds (voir encart 1, p. 13) cette vitesse d'onde dépend de la taille maximale du nageur, L , et de l'accélération gravitationnelle, g . Quand il est en position de coulée, les bras tendus devant, c'est la distance de la pointe

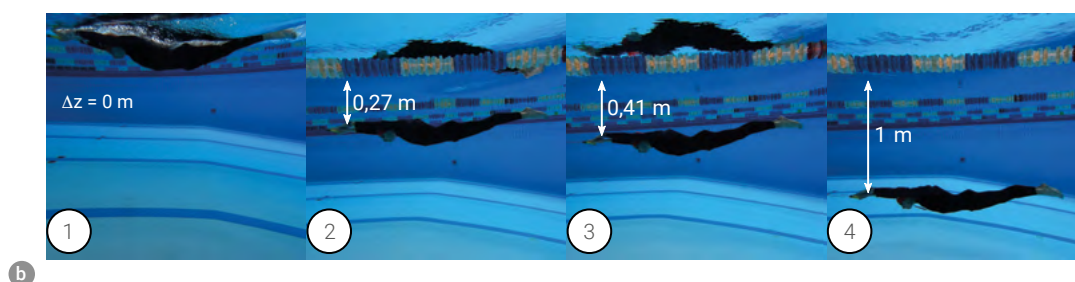
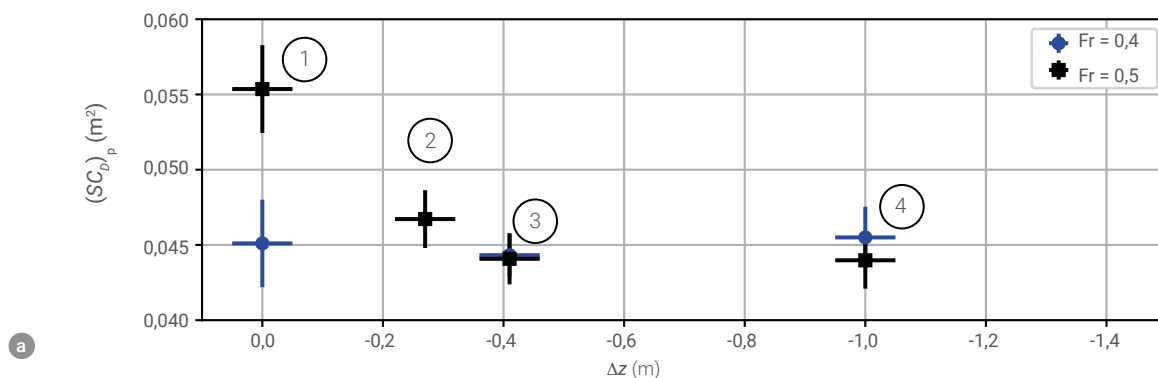
de ses pieds au bout de ses doigts, soit près de 2,6 m pour un homme de taille 1,85 m. On définit ainsi un nombre adimensionnel, le nombre de Froude :

$$Fr = V / (gL)^{1/2} \quad (5).$$

Dans le naval, il est bien connu que l'effet des vagues n'est pas monotone avec la vitesse (ou le nombre de Froude) et présente une forme de cloche avec un maximum proche d'un nombre de Froude $Fr = 0,5$, soit pour nos nageurs $V = 2,5$ m/s. La figure 7 montre l'évolution de la force (a) et de la surface de trainée (b) en fonction de la vitesse et/ou du nombre de Froude pour un nageur tiré à la surface en position de coulée. Sur la figure 7a, la courbe en tirets représente une résistance à l'avancement quadratique avec la vitesse, comme considérée dans les équations 2 et 3. On voit ainsi qu'à basse vitesse, la force de résistance (la trainée) est bien quadratique. Mais la force croît plus vite qu'une loi quadratique en V^2 pour des vitesses supérieures à 2 m/s, dans les gammes de vitesses qui nous intéressent. Sur la figure 7b, on représente la surface de trainée en fonction du nombre de Froude. Le coefficient de trainée pour

“ Une façon simple d'éviter l'effet de « trainée de vague » est de se déplacer sous l'eau, suffisamment loin de la surface.”

>>>



8. Effet de la profondeur sur la trainée de vague. (a) Surface de trainée en fonction de la profondeur pour deux nombres de Froude. (b) Images des positions du nageur.



- 1• FINA swimming rules, part III, 2023-2025, 2023.
- 2• AreteSwim. 1988 Olympic Men's 100 m Backstroke final Daichi Suzuki, Apr. 2012.
- 3• Enisey. Denis Pankratov, Atlanta 1996, 100 m butterfly, Mar. 2008.
- 4• R.H. Morton, "A three-component model of human bioenergetics", *Journal of Mathematical Biology*, **24** (1986) 451-466. .
- 5• G. Bradski, "The OpenCV Library", *Dr. Dobbs' Journal of Software Tools* **25** (2000) 120, 122-125.
- 6• J. Vantorre, D. Chollet, et L. Seifert, "Biomechanical Analysis of the Swim-Start: A Review", *Journal of Sports Science & Medicine*, **13** (2014) 223-231.
- 7• C. Caspersen et al., "Added mass in human swimmers: age and gender differences", *Journal of Biomechanics*, **43** (2010) 2369-2373.

>>>

notre nageur a une forme en cloche, comme attendu. Le coefficient de trainée peut augmenter de près de 40% à la surface, à cause des effets de vague pour des nombres de Froude proches de $Fr = 0,5$. Une façon simple d'éviter cet effet est de se déplacer sous l'eau suffisamment loin de la surface.

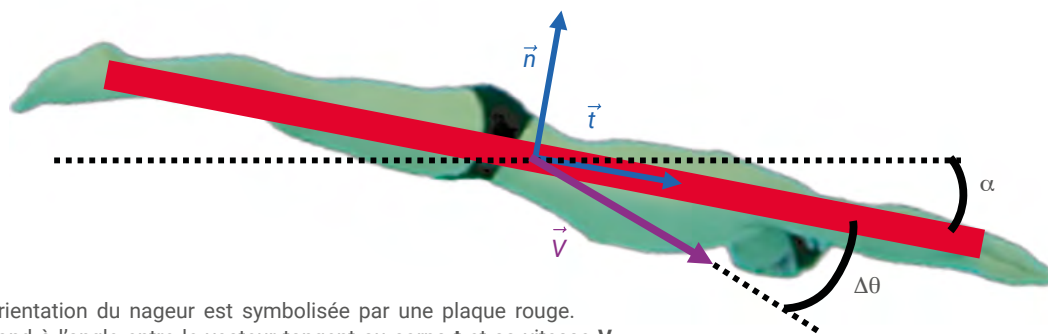
La figure 8 montre l'évolution de la résistance en fonction de la profondeur du nageur pour deux nombres de Froude : $Fr = 0,4$ et $Fr = 0,5$. Le dernier correspond au maximum des effets de vague observés à la surface. On voit que la résistance décroît très rapidement dans ce cas et qu'il n'est pas nécessaire de plonger bien plus profond qu'un mètre sous l'eau pour ne plus subir cette trainée supplémentaire. Notre nageur sur la figure 3 (p. 16) l'a bien compris.

La (ou les) bonne(s) stratégie(s)

Comme illustré sur la figure 1, pour être le plus rapide sur 15 mètres, il n'existe pas de stratégie universelle. Il faut faire du cas par cas : du sur-mesure. Des paragraphes précédents, nous avons compris qu'il fallait s'éloigner de la surface de typiquement un mètre à l'entrée dans l'eau pour réduire les résistances, et attendre avant de déclencher les ondulations pour ne pas se freiner en cherchant à se propulser trop hâtivement. Il faudra ensuite remonter.

Dans la phase de descente avant de se propulser, il faut redresser la trajectoire. Les nageurs le font en jouant sur leur angle d'attaque, $\Delta\theta$ (fig. 9). C'est l'angle qu'ils donnent à leur corps par rapport à leur trajectoire (ou

Le travail présenté dans cet article a été réalisé et financé dans le cadre du projet ANR NePTUNE (PIA-19-STHP-0004) en vue des Jeux Olympiques et Paralympiques de Paris 2024. Les auteurs tiennent particulièrement à remercier Magali Rathier pour son aide dans l'organisation et la planification des séances, Thomas Cassard pour son appui technique indispensable dans l'utilisation des moyens de mesures et audiovisuels de la piscine de l'INSEP. Enfin, les auteurs remercient chaleureusement les nageurs que nous avons eu la chance de suivre depuis 2021 et qui ont participé aux différents tests.



9. Les angles du nageur. L'orientation du nageur est symbolisée par une plaque rouge. L'angle d'attaque, $\Delta\theta$, correspond à l'angle entre le vecteur tangent au corps $\vec{t}$ et sa vitesse $\vec{V}$. L'angle du corps avec l'horizontale est noté α .

vitesse). Comme une aile d'avion, ils vont ainsi créer une portance et réduire leur vitesse d'enfoncement. Cependant, plus ils vont créer de la portance, plus ils vont augmenter leur trainée également. Il est donc important de connaître ce qu'on appelle la « polaire » du nageur pour optimiser ce choix. C'est le lien entre l'angle d'attaque, la portance et la trainée. Il suffit en pratique de faire un départ où le nageur se laisse glisser pour l'obtenir. En jouant sur cet angle, les nageurs vont réduire leur vitesse d'enfoncement et machinalement redresser leur corps et tendre vers une position plus horizontale ($\alpha \rightarrow 0$).

Le nageur va ensuite utiliser ses ondulations pour changer de direction. On note $\dot{\alpha}$ cette vitesse de rotation. L'angle α augmente alors jusqu'à une valeur cible, α_{max} , que le nageur maintiendra et qui donnera cette trajectoire en quasi-ligne droite vers la surface.

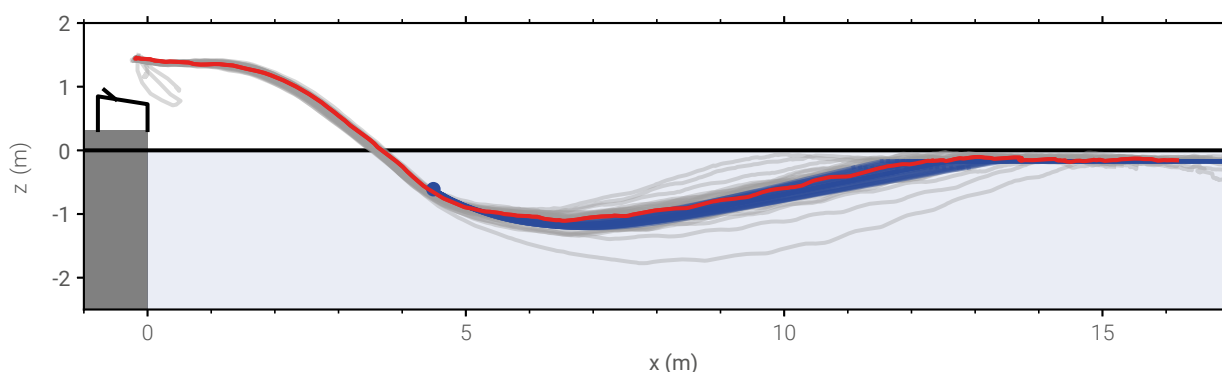
On peut donc simplifier l'optimisation en ne jouant que sur ces trois paramètres ($\Delta\theta$, $\dot{\alpha}$ et α_{max}) et le *timing* d'activation. On teste ainsi pour notre nageur différentes stratégies de coulée, profondeurs et longueurs. Il faut en amont mesurer les paramètres physiques du nageur : sa masse, sa vitesse (en ondulation et à la surface), ses résistances en ondulation et à la surface, et sa résistance passive. On peut obtenir ces informations en observant de nombreux départs et en faisant des tests spécifiques dédiés (comme les départs arrêtés et le départ en se laissant glisser).

La figure 10 montre le résultat d'un tel travail : en traits continus l'ensemble des départs d'un nageur, le meilleur étant souligné en rouge. La zone bleue représente la fenêtre qui permet de réaliser au centième près le même temps au 15 m dans notre modèle. On voit que ce nageur (de très haut niveau) est très proche de l'optimum !

Grâce à cette approche, nous pouvons aider les nageurs à optimiser leur trajectoire pour différentes stratégies de course. Le conseil est adapté aux caractéristiques du nageur au cas par cas.

Conclusion

Au départ en natation, il faut profiter le plus longtemps possible de la vitesse initiale du plongeon. Le règlement autorise à couvrir jusqu'à 15 mètres sous l'eau. Pour être le plus efficace, il faut ajuster cette trajectoire : s'éloigner rapidement de la surface pour ne pas être freiné par les vagues, se laisser glisser pour profiter de la faible résistance en position en flèche, avant de déclencher la phase d'ondulation pour remonter vers la surface. La distance de coulée optimale dépend des caractéristiques hydrodynamiques des nageurs (résistance de nage, force de propulsion) et peut être optimisée au cas par cas. ■



10. Trajectoires observées et zone optimale pour un nageur d'élite. Les trajectoires en gris et rouge partant du plot correspondent à l'ensemble des départs réalisés par un des nageurs. La trajectoire en rouge est sa meilleure performance. La zone en bleu correspond à la zone optimale obtenue par notre modèle simplifié de départ.