

Réflexions Sport

Numéro spécial

EXTRAIT

A close-up photograph of a swimmer's hand and a blue swim cap breaking the surface of the water, creating a splash. The background is a blurred blue pool setting with some white text like 'TA' and 'MEGA' visible on a wall.

Neptune,
un projet scientifique
interdisciplinaire au service
de la performance
en natation et para-natation

Réflexions Sport, n° 32, novembre 2024 : La science aux service des JOP

P. 52-63

e-ISSN : 2265-5441

Institut national du sport, de l'expertise et de la performance

Neptune, un projet scientifique interdisciplinaire au service de la performance en natation et para-natation

Ludovic Seifert

Université de Rouen Normandie, CETAPS UR3832, Institut Universitaire de France (IUF)

Rémi Carmigniani

École Nationale des Ponts et Chaussées

Robin Pla

Fédération française de natation

Guillaume Domingo

Fédération Française Handisport


Résumé

L'objectif de Neptune, « Natation et paranatation : tous unis avec nos élites », est de fournir aux entraîneurs et aux nageurs français des outils et des méthodes (1) pour évaluer les facteurs clés de la performance (par ex. rapport fréquence gestuelle/amplitude, vitesse, résistance de l'eau, force, efficacité de la glisse, coordination motrice, etc.), (2) pour identifier les différents profils de nageur afin d'individualiser l'entraînement, et (3) pour réaliser des modèles physiques afin d'optimiser le geste. Pour atteindre cet objectif principal, nous sommes partis de l'analyse des compétitions, en particulier pour améliorer les stratégies de gestion de course des nageurs français et acquérir une meilleure connaissance des

stratégies adverses, puis nous avons évalué les facteurs clés évoqués précédemment au cours de situations expérimentales, à partir desquelles les connaissances peuvent être transférées aux entraîneurs pour le suivi des nageurs. Nous avons construit un projet interdisciplinaire avec trois axes de recherche mêlant les sciences informatiques et la vision par ordinateur, la biomécanique, le contrôle moteur, la physiologie, la physique, la mécanique des fluides et les mathématiques appliquées : (1) stratégies de suivi et d'allure, (2) coordination, propulsion et énergétique, (3) résistance de l'eau et *drafting*.

Mots-clés : (para)natation, analyse de compétition, suivi vidéo, coordination, propulsion, énergétique, résistance

Le projet NePTUNE bénéficie d'une aide de l'État gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme d'investissements d'avenir portant la référence ANR-19-STHP-0004. Les résultats ci-dessous sont le fruit du travail collectif du consortium Neptune et dépassent la contribution des quatre auteurs ; nous remercions vivement tous les acteurs du projet Neptune qui ont permis l'atteinte d'objectifs scientifiques et sportifs.



Neptune, un projet scientifique interdisciplinaire au service de la performance en natation et para-natation

Ludovic Seifert

Université de Rouen Normandie, CETAPS UR3832,
Institut Universitaire de France (IUF)

Rémi Carmigniani

École Nationale des Ponts et Chaussées

Robin Pla

Fédération française de natation

Guillaume Domingo

Fédération Française Handisport



Naissance, consortium et objectifs du projet Neptune

La natation fait partie des sports les plus représentés aux Jeux olympiques et paralympiques. Les travaux de recherche sont très nombreux, avec un ancrage historique en 1971 lors de la première édition du congrès « Biomechanics and Medicine in Swimming », qui depuis a lieu tous les quatre ans. Pour autant, les entraîneurs et les nageurs ne se sont pas toujours intéressés à ces travaux de recherche qui restaient souvent trop fondamentaux ou qui nécessitaient une instrumentation importante pour pouvoir être réalisés régulièrement au bord des bassins, avec un délai de traitement des données et de retour aux entraîneurs trop long. Les progrès technologiques et l'intelligence artificielle ont permis de lever certains verrous techniques, un gain de temps dans les traitements, notamment grâce à leur automatisation, sans trop dégrader la précision. Même si des améliorations restent à faire, ces progrès techniques permettent actuellement de conjuguer la recherche fondamentale dans différents domaines et la recherche appliquée au service de l'entraînement. Ces deux orientations sont au fondement du projet Neptune, « Natation et paranatation : tous unis avec nos élites », qui regroupe un consortium interdisciplinaire composé de treize partenaires dont deux fédérations sportives (Fédération française de natation et Fédération française handisport), des grandes écoles (École des Ponts, INSA Lyon, École centrale de Lyon, ENS Cachan), des universités (universités de Rouen Normandie, de Caen Normandie, de Lille, Claude Bernard Lyon 1, d'Orléans et de Rennes) et l'INSEP. Ce projet poursuit

trois axes de recherche en accord avec trois défis proposés par l'appel à projet « Sport de Très Haute Performance » : le cinquième (Apprentissage et optimisation de la performance), le septième (Big Data et intelligence artificielle au service de la performance) et le neuvième (Spécificité du paralympique).

Un premier axe concerne le suivi vidéo automatique et les stratégies de gestion de course des nageurs français en compétition et lors de simulations de course à l'entraînement. L'analyse des compétitions permet d'identifier différents profils de gestion de course et ainsi d'analyser la concurrence. Un second axe s'intéresse à l'évolution des coordinations motrices, des paramètres d'efficacité de la propulsion et aux parties non nagées (départ, virage). Le travail réalisé permet d'établir une carte d'identité du nageur en identifiant deux régimes de fonctionnement grâce à l'utilisation de capteurs de mouvement (centrales inertielle), puis d'évaluer la coordination motrice et l'asymétrie de coordination en fonction de la fréquence gestuelle, du handicap moteur, la modalité respiratoire. Le troisième axe se focalise sur les résistances aquatiques (individuel et en groupe) et l'évaluation du profil charge-vitesse, car la haute performance et l'économie ne sont pas seulement dues à une propulsion efficace mais aussi à la minimisation des résistances passives et actives.

Pour chacun de ces axes, le projet développe des méthodes et outils innovants, avec une version facile et rapide d'usage pour l'intervention et le suivi des nageurs par les entraîneurs, et une version plus avancée pour des mesures et recherches scientifiques plus élaborées sur le mouvement,

l'énergétique humaine et l'optimisation de la performance. Dans la pratique, certaines méthodes et certains outils ont été développés plus rapidement que d'autres et sans homogénéité territoriale ; ceci pour différentes raisons. Le service optimisation de la performance de la FFN a pour habitude de venir en support aux entraîneurs nationaux pour répondre à des questions précises et individuelles. Selon cette même logique, le projet Neptune n'a pas été déployé de manière homogène dans tous les pôles France, mais selon les besoins et sensibilités des entraîneurs nationaux. Cela a été autant un frein qu'un avantage : un frein, car pour démontrer l'effet d'un phénomène d'un point de vue statistique, pour le modéliser, pour faire de l'apprentissage statistique (*machine learning*) ou de l'apprentissage profond (*deep learning*), un nombre important de données dans des conditions standards est nécessaire ; un avantage, car les échanges avec les entraîneurs ont permis de répondre à leurs besoins (qui eux-mêmes sont alimentés par des problématiques propres à chaque nageur) et de concevoir des tests, des méthodes et des outils utiles pour l'entraînement et pas uniquement pour répondre à des questions scientifiques. Ces échanges ont d'ailleurs fait émerger des problématiques qui n'étaient pas présentes au début du projet, tandis que d'autres problématiques qui avaient moins retenu l'attention des entraîneurs ont été moins développées. En fin de compte, c'est véritablement la co-construction et la capacité d'adaptation des différents acteurs qui ont permis de répondre à des enjeux à la fois scientifiques et sportifs.

“... conjuguer la recherche fondamentale dans différents domaines et la recherche appliquée au service de l'entraînement.”

Mise en œuvre du projet

L'analyse de compétition et de simulation de compétition

Avant l'analyse des compétitions de natation, l'entraîneur ne disposait que des temps de passage et d'impressions subjectives de « l'œil de l'entraîneur » pour analyser les performances des nageurs. La natation de compétition est une activité locomotrice cyclique pour laquelle les nageurs doivent gérer stratégiquement les paramètres de nage, c'est-à-dire l'amplitude (SL) et la fréquence gestuelle (SR) afin de garantir une vitesse de nage élevée avec peu de fluctuations entre et au sein des cycles (Schnitzler *et al.*, 2010). En effet, les fluctuations de vitesse sont positivement corrélées au coût énergétique de la locomotion (Vilas Boas *et al.*, 2011) et aux discontinuités entre les actions propulsives (Schnitzler *et al.*, 2010 ; Seifert *et al.*, 2010).

Bien que la Fédération française de natation (FFN) analyse les compétitions nationales et internationales à partir de son propre système de captation vidéo et logiciel d'annotation depuis 1987, ce dispositif reste

manuel et requiert plusieurs caméras pour suivre l'ensemble des nageurs, si bien que la captation focalise sur les nageurs français et à la marge quelques nageurs étrangers. L'autre limitation est liée à l'absence de calibration spatiale de la piscine qui ne permet que des analyses subjectives par zones facilement repérables grâce aux marqueurs des lignes d'eau (0-15 m, 15-25 m, 25-45 m, 45-50 m). Ainsi, un premier axe concerne l'analyse de compétition, avec un enjeu majeur en vision assistée par ordinateur pour réaliser le suivi automatique des nageurs à partir de captations vidéo, et avec un enjeu en science des données pour analyser les différentes stratégies de gestion de course (Simbaña Escobar *et al.*, 2018a ; Simbaña-Escobar *et al.*, 2018b). Néanmoins, filmer les compétitions avec des caméras sous-marines n'étant pas autorisé, il n'est pas possible d'analyser la technique de nage et les parties non nagées (départ et virages). De ce fait, nous avons aussi étudié des simulations de course grâce à l'instrumentation de la piscine de l'INSEP avec un système de capture de mouvement (AIM©, Suède) composé de 22 caméras (12 sous-marines et 10 aériennes) permettant un suivi automatique du nageur pour réaliser des analyses cycle à cycle. Sur la base du système multi-caméras, un algorithme de suivi du nageur plus avancé a été développé pour analyser plus spécifiquement les phases de départ (partie aérienne et sous-marine) et les virages en plus des parties nagées. D'abord, les caméras ont été calibrées dans l'espace afin de pouvoir reconstruire une vue panoramique du départ du nageur capable également de s'adapter à son placement dans la largeur de la ligne d'eau. Les images ainsi générées sont analysées par notre intelligence artificielle afin d'estimer

la position du nageur dans le bassin. On obtient ainsi le geste du nageur, sa position et son temps. Un effort important a été réalisé afin de permettre d'utiliser cet outil en condition d'entraînement, en optimisant les étapes d'analyse pour proposer des retours quelques minutes après un passage. La Fig. 1 illustre le résultat de cet outil sur le départ d'un nageur.

L'analyse des paramètres d'efficacité de la propulsion, de la coordination motrice et des aspects énergétiques

L'avancement en natation étant régi par la génération de propulsion et la minimisation des résistances, un second axe s'est intéressé à l'évaluation des paramètres d'efficacité de la propulsion, notamment les fluctuations de vitesse et la fluidité du déplacement (*jerk cost*, voir Bouvet *et al.*, 2023). Les modifications du rapport fréquence/amplitude et de la coordination motrice permettent au nageur de maintenir son efficacité propulsive dans le temps mais peuvent avoir un impact sur la dépense énergétique. Étant donné la difficulté et le coût élevé pour instrumenter une piscine avec un système multi-caméras, une autre orientation pour capturer le mouvement a été d'utiliser des centrales inertielles (composées d'accéléromètres tridimensionnels, de gyroscopes tridimensionnels et de magnétomètres tridimensionnels) afin de disposer d'une solution technologique transportable, miniature, étanche et facile à installer pour évaluer la technique de nage. L'utilisation des centrales inertielles a permis d'identifier les points clés déterminant les phases propulsives et non propulsives du cycle de nage (Regaieg *et al.*, 2023), puis le mode de coordination motrice a été évalué grâce à

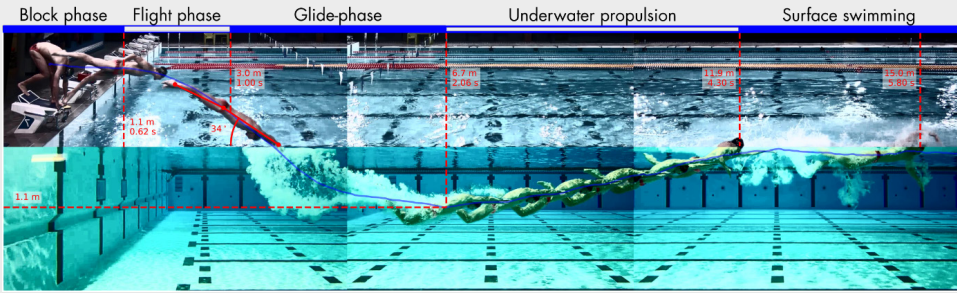


Figure 1 – Vue panoramique d'un départ.

un index de coordination (IdC) (selon qu'il y a un temps mort, une continuité ou un chevauchement entre deux phases propulsives) (Chollet et Seifert, 2011). L'évaluation de la symétrie entre le côté droit et le côté gauche de coordination motrice s'est révélée un indicateur pertinent à mettre en relation avec le côté préférentiel d'inspiration en cas de respiration unilatérale et le côté du handicap chez les para-nageurs ayant une amputation ou agénésie unilatérale. Cela a en effet permis de juger si opposer le côté respiratoire au côté du handicap pouvait rééquilibrer l'asymétrie de coordination motrice observée et surtout si cette rééquilibration permettait une meilleure économie ou efficacité technique. De là, nous avons testé l'effet de différentes modalités respiratoires sur la symétrie de coordination motrice en crawl, notamment des modalités supposées permettre une symétrie de coordination (utiliser un tuba frontal, une respiration bilatérale comme inspirer tous les trois mouvements de bras, ou nager en apnée) et des modalités supposées amener une asymétrie de coordination (utiliser une respiration unilatérale, comme inspirer tous les deux ou quatre mouvements de bras du côté préférentiel et non préférentiel) (Seifert *et al.*, 2024).

Bien que le projet Neptune ait bénéficié principalement aux (para)nageurs élités, et en particulier ceux potentiellement médaillables aux JOP de Paris 2024, il nous a semblé important de diffuser les outils et méthodes aux nageurs espoirs qui formeront l'élite de demain. Certains jeunes étant encore en cours de développement, un test de 10 × 25 m incrémenté en vitesse a permis d'établir une carte d'identité du nageur en identifiant deux régimes de fonctionnement : un régime de glisse ou de coordination constante (courbe en pointillés épais) et un régime de force maximale (courbe en pointillés fins) (Fig. 2) (Carmigniani *et al.*, 2020). Dans le régime de coordination constante, les nageurs conservent une répartition de leurs temps de glisse sur la durée du cycle totale constante. L'augmentation de la vitesse (V) de nage se fait grâce à une augmentation proportionnelle de la fréquence gestuelle (SR) et à une amplitude constante (SL). Une coordination motrice en glisse permet de minimiser la consommation d'énergie pour des vitesses inférieures à une vitesse critique correspondant à l'indice de nage maximal ($IN = V \times SL$). Dans le régime de force maximum, les nageurs poussent le plus fort qu'ils peuvent à chaque cycle et contrôlent leur vitesse en jouant sur les

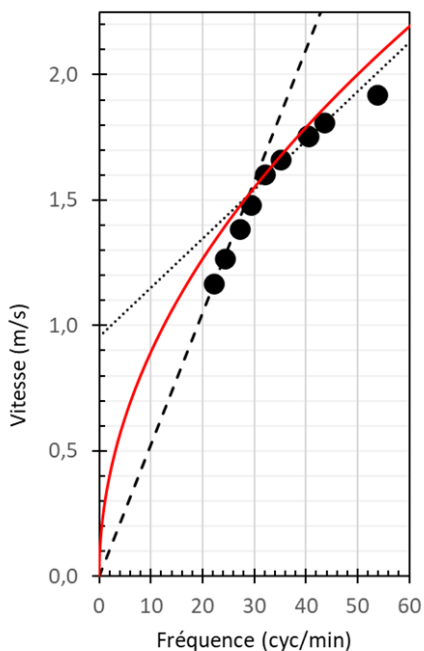


Figure 2 – Modélisation des deux régimes de fonctionnement.

temps de glisse et de retour aérien. Dans ce régime, l'amplitude diminue mais l'indice de nage est constant. Ce régime est représenté par la courbe rouge dans la Figure 2. Quand le nageur s'éloigne de cette courbe rouge, il perd en « appui » quand il augmente sa fréquence, si bien que l'augmentation de la fréquence gestuelle n'entraîne pas une augmentation proportionnelle de sa vitesse. Cette perte d'appui (correspondant au gain potentiel de vitesse) est évaluée par l'aire entre la courbe rouge et la courbe en pointillés fins et se caractérise par une baisse de l'indice de nage. Le croisement entre les deux courbes en pointillés correspond à la transition entre les deux régimes de fonctionnement et à la valeur maximale d'indice de nage.

Étant donné l'incapacité à maintenir une grande force maximale au fur et à mesure que la fréquence gestuelle augmente, il est important d'identifier à la fois la fréquence préférentielle pour une vitesse de nage donnée (souvent associée à la dépense énergétique la plus faible) et d'être capable de varier sa fréquence gestuelle autour de sa fréquence préférentielle sans augmentation démesurée de la dépense énergétique (Simbaña-Escobar *et al.*, 2020). Un deuxième test imposant des fréquences gestuelles de +/- 5 à 10 % de la fréquence préférentielle avec un métronome auditif (6 × 50 m pour les nageurs de sprints et 4 × 100 m pour les nageurs de moyenne et longue distance) a permis d'analyser la flexibilité de la fréquence gestuelle des nageurs et les conséquences sur la dépense énergétique et la coordination motrice.

L'analyse des résistances passives et actives en individuel et en peloton

Le troisième axe se focalise sur les résistances aquatiques (individuel et en groupe) et l'évaluation du profil charge-vitesse, car la haute performance et l'économie ne sont pas seulement dues à une propulsion efficace mais aussi à la minimisation des résistances passives et actives. En natation, on distingue les résistances à l'avancement lors des phases de glisse et de nage. On parle de résistance passive et active. Nous avons réalisé des tests permettant de dresser une carte d'identité des résistances passives en fonction de la position du nageur, de sa vitesse et de sa profondeur (Fig. 3).

Les résistances en phase de nage sont évaluées sur des exercices de sprints (*all-out*) soit en départ arrêté (le nageur part sans vitesse initiale et sans pousser au

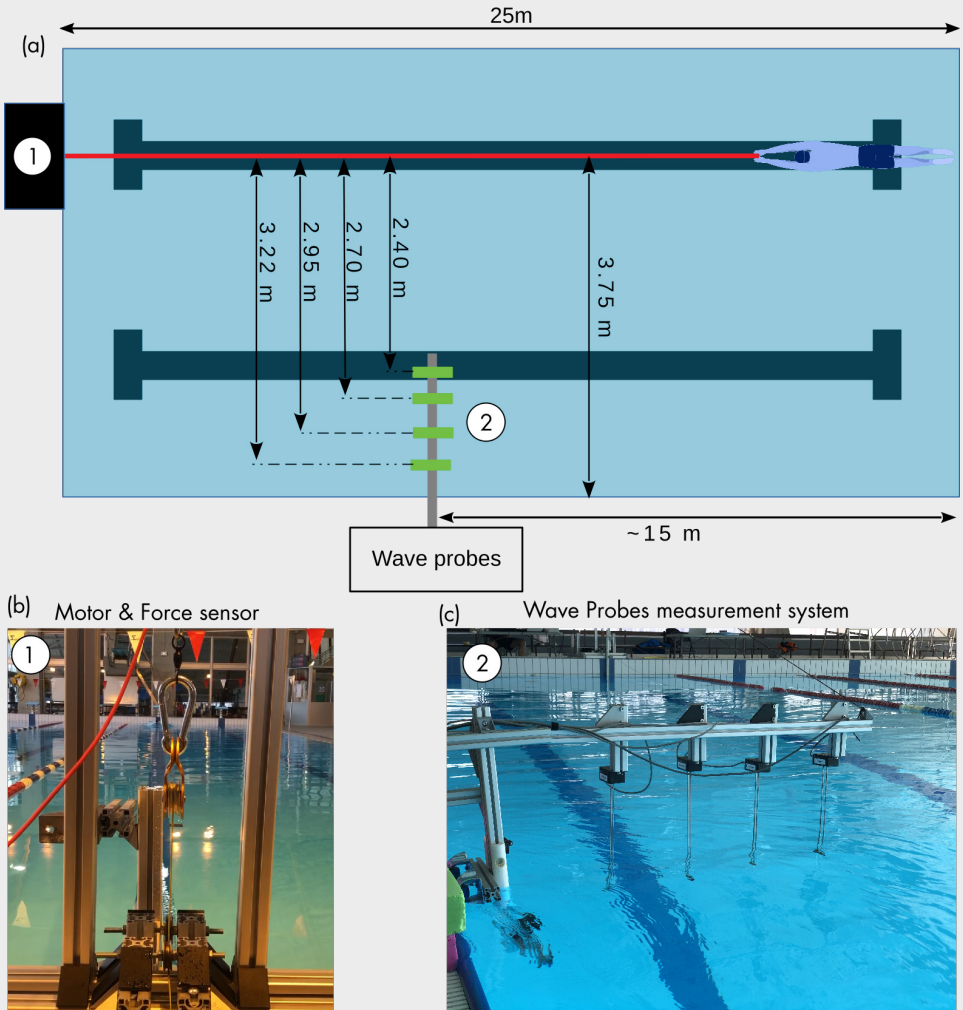


Figure 3 – Évaluation des résistances passives en natation.

mur) soit avec une charge additionnelle (le nageur est légèrement retenu à l'aide d'une résistance connue, souvent générée par un moteur). Il faut une modélisation de la nage pour permettre de remonter à la résistance et une hypothèse de fermeture pour réduire le nombre d'inconnues.

Deux fermetures sont proposées dans la littérature : puissance mécanique utile constante (Kolmogorov et Duplishcheva, 1992) ou force de propulsion moyenne constante (Takagi *et al.*, 1999). Aucune des deux ne permet de comprendre à la fois l'évolution de la vitesse avec la charge

additionnelle et la relation vitesse-fréquence de l'axe précédent. Nous avons proposé une nouvelle approche permettant d'avoir un modèle unique de nage : une impulsion constante. Cette hypothèse est très proche de celle de Takagi *et al.* (1999) mais permet de s'affranchir de la fréquence constante supposée par ces derniers. Il reste que lors de ces tests avec charge additionnelle, une hypothèse forte est faite sur le fait que le nageur n'est que faiblement perturbé dans son geste (Fig. 4).

Si les nageurs en compétition sont seuls dans un couloir et séparés par des lignes d'eau pour limiter les interactions, en eau libre, ils peuvent nager très proches les uns des autres. Nous avons exploré ces effets d'interaction ou *drafting* à l'aide d'un modèle réduit. Nous avons pu ainsi identifier les meilleures positions et les stratégies de dépassement dans des configurations à deux nageurs et dans des pelotons afin de pouvoir discuter des stratégies de course pour ces épreuves (Fig. 5).

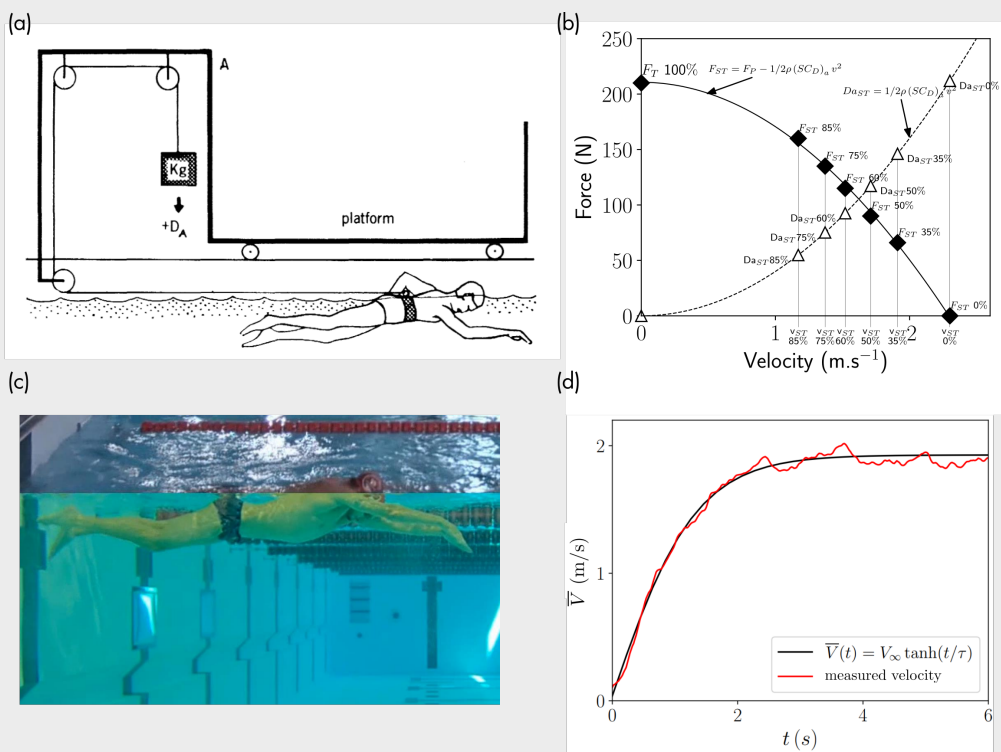


Figure 4 – Les mesures de résistance active.

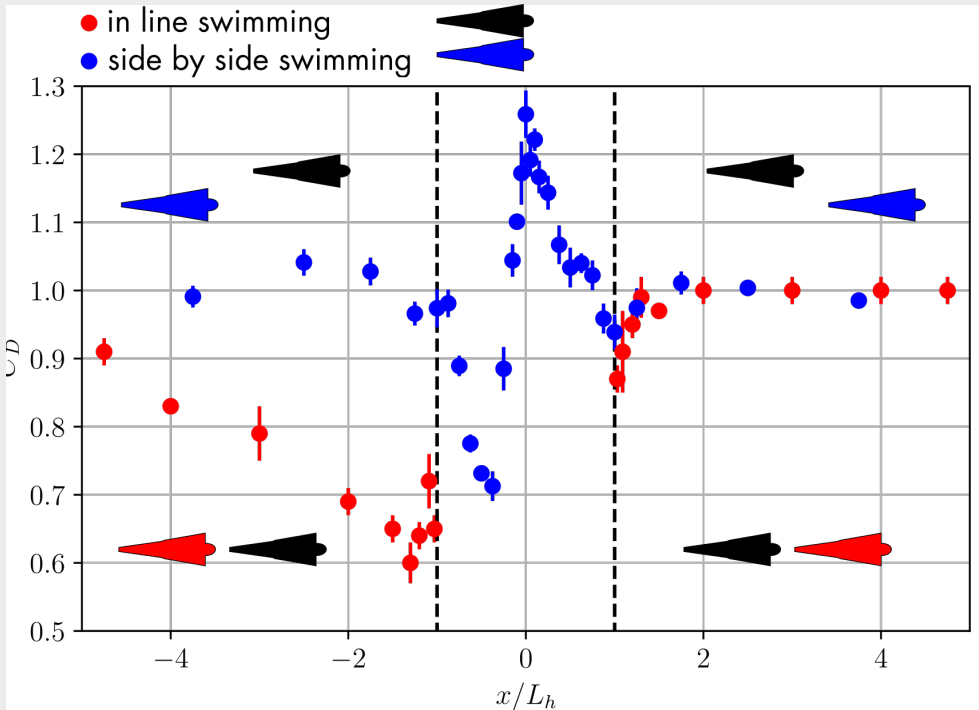


Figure 5 – Impact de la position sur la résistance à l'avancement de nageurs.

Résultats en vue des JOP et perspectives après les JOP de Paris 2024 pour les fédérations et les entraîneurs

Comme énoncé préalablement, pour chacun des trois axes, le projet a permis le développement de méthodes et outils innovants, avec une version facile et rapide d'usage pour l'intervention et le suivi des nageurs par les entraîneurs, et une version plus avancée pour des mesures et recherches scientifiques plus élaborées sur le mouvement, l'énergétique humaine et l'optimisation de

la performance. Nous avons fourni à la fois des connaissances sous forme de comptes rendus, des outils et méthodes (par ex., test de terrain) sous forme de tutoriels ; nous finalisons des interfaces qui permettront une acquisition et un traitement plus faciles des données collectées par des systèmes multi-caméras ou par des capteurs de mouvements, afin de dépasser les prototypes et les algorithmes qui nécessitent des compétences avancées en programmation. À partir des analyses de compétition et du suivi à l'entraînement, ces outils et méthodes ont permis de confirmer ou d'infirmer les intuitions des entraîneurs pour (ré)orienter leur entraînement.

“... déployer ces tests, outils et méthodes dans les pôles France et espoirs qui n’en auraient pas encore profité pour former les générations de nageurs et d’entraîneurs de demain.”

Pour la préparation des JOP de Paris 2024, une grande partie de l’équipe de France de natation et para-natation a pu bénéficier des outils développés par Neptune. À l’INSEP, les nageurs du Centre national d’entraînement ont notamment pu travailler leur trajectoire de coulées à plus d’une vingtaine de reprises, en routine. Des progrès sur les temps réalisés après les 15 premiers mètres de course ont déjà été observés chez certains d’entre eux, grâce aux analyses faites en compétition. D’autres têtes d’affiche sont passées par l’INSEP pour évaluer cette trajectoire de coulée : F. Manaudou, M. Wattel et M. Hénique par exemple. Par ailleurs, la majeure partie des meilleurs nageurs français utilisent aujourd’hui les mesures de résistances et de profilage charge-vitesse avec le 1080. Les groupes de Font-Romeu, Marseille et Antibes y ont eu recours plusieurs fois ces deux dernières années. Léon Marchand – exilé aux États-Unis – a lui aussi pu faire un profilage hydrodynamique lors des

derniers championnats de France à Rennes. Le test de 10 × 25 m permettant d’établir les deux régimes de fonctionnement et l’analyse de la coordination motrice grâce aux centrales inertielles a été largement déployé auprès des centres nationaux de l’INSEP, de Toulouse et de Font-Romeu, mais aussi pour les populations plus jeunes. Il a également bénéficié à A. Hanquinquant, multiple champion de France de para-triathlon et champion paralympique à Tokyo en 2021.

Bien entendu, il est toujours difficile d’établir un lien entre les progrès réalisés et ces apports scientifiques et technologiques. Néanmoins, nous observons une adhésion de plus en plus forte de la part des nageurs et de leurs entraîneurs. Après les JOP, l’objectif sera de rendre ces outils et ces méthodes faciles à utiliser pour s’assurer de leur emploi de manière régulière. Tout cela devra également déboucher sur des *feedbacks* rapides. C’est la combinaison de ces deux facteurs (facilité d’utilisation et retour d’informations immédiat) qui permettra une utilisation régulière de ces outils. La causalité avec la performance sera alors encore plus facile à démontrer et à établir. Une autre perspective après les JOP de Paris 2024 consiste à déployer ces tests, outils et méthodes dans les pôles France et espoirs qui n’en auraient pas encore profité pour former les générations de nageurs et d’entraîneurs de demain.

Bibliographie

Bouvet, A., Pla, R., Delhaye, E., Nicolas, G. et Bideau, N. (2023). Profiles of stroke regulations discriminate between finishing positions during international open water races. *Journal of Sports Sciences*, 41(13),

1309-1316. <https://doi.org/10.1080/02640414.2023.2268902>

Carmigniani, R., Seifert, L., Chollet, D. et Clanet, C. (2020). Coordination changes in front-crawl swimming. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 476(2237), 20200071–20200071. <https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0071>

Chollet, D. et Seifert, L. (2011). Inter-limb coordination in the four competitive strokes. Dans L. Seifert, D. Chollet et I. Mujika (dir.), *The world book of swimming: From science to performance* (p. 153-172). Nova Science Publishers.

Kolmogorov, S. V. et Duplishcheva, O. A. (1992). Active drag, useful mechanical power output and hydrodynamic force coefficient in different swimming strokes at maximal velocity. *Journal of Biomechanics*, 25(3), 311-318. [https://doi.org/10.1016/0021-9290\(92\)90028-Y](https://doi.org/10.1016/0021-9290(92)90028-Y)

Regaieg, M. A., Létocart, A. J., Bosche, J., Seifert, L. et Guignard, B. (2023). Automatic detection of key points of the cycle to assess upper limb coordination in front crawl: effect of swimming speed and impairment. *IEEE Sensors Journal*, 23(16), 17979-17989. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3290648>

Schnitzler, C., Seifert, L., Alberty, M. et Chollet, D. (2010). Hip velocity and arm coordination in front crawl swimming. *International Journal of Sports Medicine*, 31(12), 875-881. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1265149>

Seifert, L., Létocart, A., Guignard, B. et Regaieg, M. A. (2024). Effect of breathing conditions on relationships between impairment, breathing laterality and coordination symmetry in elite para swimmers. *Scientific Reports*, 14(1), 6456. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56872-y>

Seifert, L., Toussaint, H. M., Alberty, M., Schnitzler, C. et Chollet, D. (2010). Arm coordination, power, and swim efficiency in national and regional front crawl swimmers. *Human Movement Science*, 29(3), 426-439. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2009.11.003>

Simbaña Escobar, D., Hellard, P., Pyne, D. B. et Seifert, L. (2018a). Functional role of movement and performance variability: adaptation of front crawl swimmers to competitive swimming constraints. *Journal of Applied Biomechanics*, 34(1), 53-64. <https://doi.org/10.1123/jab.2017-0022>

Simbaña-Escobar, D., Hellard, P. et Seifert, L. (2018b). Modelling stroking parameters in competitive sprint swimming: Understanding inter- and intra-lap variability to assess pacing management. *Human Movement Science*, 61, 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.08.002>

Simbaña-Escobar, D., Hellard, P. et Seifert, L. (2020). Influence of stroke rate on coordination and sprint performance in elite male and female swimmers. *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*, 30(11), 2078-2091. <https://doi.org/10.1111/sms.13786>

Takagi, H., Shimizu, Y. et Kodan, N. (1999). A Hydrodynamic Study of Active Drag in Swimming. *JSME International Journal Series B*, 42(2), 171-177. <https://doi.org/10.1299/jsmeb.42.171>

Vilas Boas, J. P., Fernandes, R. J. et Barbosa, T. (2011). Intra-cyclic velocity variations, swimming economy, performance, and training in swimming. Dans L. Seifert, D. Chollet et I. Mujika (dir.), *The world book of swimming: From science to performance* (p. 119-134). Nova Science Publishers.