



HAL
open science

Biohydrodynamique et simulations numériques

Alban Leroyer, Michel Visonneau

► **To cite this version:**

Alban Leroyer, Michel Visonneau. Biohydrodynamique et simulations numériques . La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2005, 91 (3), pp.45-51. 10.1051/lhb:200503006 . hal-03376007

HAL Id: hal-03376007

<https://hal.science/hal-03376007>

Submitted on 13 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Biohydrodynamique et simulations numériques

Biohydrodynamics and numerical simulations

Alban Leroyer

LMF-EMN UMR-CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes

Michel Visonneau

LMF-EMN UMR-CNRS 6598, Ecole Centrale de Nantes

This article deals with fields of research linked to biohydrodynamics. After an historical review, modelisation and numerical studies of swimming fish will be presented. In a second part, works performed by the CFD Team of the Laboratory of Fluid Mechanics for the CNRS Robea Project will be presented. This project aims at building a prototype of an auto-propulsive fish-like robot. Results of the first 3D computations coupling RANS equations and the Newton's law of motion applied to a flexible fish-like body will be presented. Outlooks will complete this article.

I ■ ÉTAT DE L'ART EN BIOHYDRODYNAMIQUE

● I.1 De l'observation à la simulation

Depuis des millions d'années, les lois de l'évolution ont permis aux différentes espèces vivantes de s'adapter à leur milieu. Ceci est notamment le cas pour les quelques 22 000 espèces de poissons qui ont développé des techniques de nage différentes selon leur besoin. Cela s'exprime souvent par des rendements énergétiques très élevés et aussi par une manœuvrabilité et une très grande agilité dans leur déplacement, sans commune mesure avec les engins marins créés par l'Homme. Cette avance technologique de la Nature a motivé depuis le début du XX^e siècle, de très nombreuses études sur ces techniques de nage.

● I.2 Petite immersion dans l'Histoire

Bien avant la mise en place des équations de la mécanique classique, Aristote initie l'étude du biomimétisme aquatique quatre siècles avant J.C., en tentant d'expliquer la locomotion des poissons dans *Le Mouvement des Animaux* (premiers textes répertoriés sur le sujet en Europe). Beaucoup plus tard, Borelli, professeur à Naples après avoir été étudiant de Galilée, a porté aussi le même projet. Ces travaux furent publiés dans *De motu animalium* après sa mort en 1680. Borelli décrit le mouvement de la nageoire caudale comme moyen de propulsion. Pour lui, l'oscillation de cette nageoire était décomposée en une phase passive d'armement en C (de la position rectiligne jusqu'au maximum de cour-

bure) et d'une phase active de propulsion (retour en position centrale en poussant l'eau). Les conclusions erronées de ces recherches n'ont pas trouvé d'écho pendant près de deux siècles. En 1873, l'observation minutieuse de saumons d'Atlantique permet à Pettigrew de remettre en cause la déformation en forme de C suggérée par Borelli. Il montre que la déformation du corps possède une double courbure et que celle-ci prend plutôt la forme d'un S. Il rapporte dans le même temps la trajectoire périodique en 8 de la nageoire caudale lors d'un mouvement d'avance du poisson et conclut qu'elle joue un rôle propulseur de manière continue. Cependant, ce n'est véritablement qu'à la fin du XIX^e siècle avec l'avènement de la cinématographie que de nouvelles recherches voient le jour et que le niveau de la connaissance entame son ascension progressive. En 1895, E.J. Marey fut un des pionniers à « filmer » par photos successives le mouvement de nombreuses variétés de poissons et notamment d'anguilles. En se basant sur ces images, Housay publia en 1912 une étude cinématique sur les roussettes et les anguilles [1]. Breder établit en 1926 une classification assez complexe des différents types de nage rencontrés : anguilliforme, carangiforme, ... [2]. Cette classification n'a pas pu être basée à l'époque sur une analyse cinématique précise. Des études plus fines [3, 4] ont montré depuis qu'elle souffre d'imperfections congénitales, les différents groupes étant mal définis. Malgré cela, elle est encore souvent utilisée à l'heure actuelle. Dans les années 30, les travaux de Sir James Gray et de ses collaborateurs ont permis de fonder les bases cinématiques de la locomotion aquatique. De ces études précises sur la cinématique de nombreuses variétés de poissons, il a extrait quelques règles générales [5]. Gray s'intéressa aussi à l'extraordinaire performance des dau-

phins. Il entreprit d'évaluer la puissance requise pour contrer les forces de traînée s'exerçant sur l'animal. Il estima d'une part la puissance des forces résistantes pour une vitesse typique (≈ 35 km/h). D'autre part, en admettant que la puissance spécifique musculaire de l'Homme est équivalente à celle de l'animal et en s'appuyant sur les travaux d'Henderson et d'Haggard en 1925 qui ont évalué cette puissance spécifique à 16,6 W par kg de muscle à partir de données sur des rameurs [6], Gray est parvenu à la conclusion paradoxale que le dauphin devait avoir une masse musculaire environ sept fois plus importante qu'en réalité pour atteindre les vitesses observées [7]. Cette mise en exergue d'un rendement étonnamment élevé chez certains poissons est passée à la postérité sous le nom de *Paradoxe de Gray*. Bien que (on le sait aujourd'hui) les différentes puissances mises en jeu aient été très mal évaluées, les travaux de Gray contribuèrent à susciter un intérêt croissant pour la locomotion animale et le biomimétisme dans la deuxième moitié du XX^e siècle comme en témoigne le nombre pléthorique d'études et de travaux qui ont été effectués et publiés depuis.

● I.3 Plongée dans l'océan des publications scientifiques

Après les travaux de Gray, de nombreuses études ont été réalisées, affinant et précisant la cinématique d'espèces diverses et variées. Pour cela, différentes méthodes d'analyse et d'observation *in vivo* ont été utilisées en bassin. Celles-ci sont répertoriées et décrites précisément par Videler [4]. Les résultats de ces observations sont d'une utilité substantielle dans la mesure où ils sont à la base du mimétisme des lois de déformation imposées au corps. Des campagnes de mesures PIV ont aussi été récemment menées autour de différentes variétés de poissons en mouvement pour tenter de mieux comprendre la structure de l'écoulement autour de celui-ci [8, 9, 10]. Différents travaux de recherches se sont attachés à relier la structure du sillage générée par leur déplacement (nombre, forme tridimensionnelle et appariement des tourbillons, ...) avec l'efficacité du mouvement. En ce qui concerne l'étude des couches limites, les moyens à mettre en œuvre pour obtenir des mesures précises sur des animaux vivants en mouvement sont tels que très peu d'études ont été entreprises. On peut cependant noter les récents travaux d'Anderson sur ce sujet [11]. En dehors de ces recherches qui s'appuient directement sur l'étude du vivant, quelques modèles mécaniques ont été réalisés pour étudier expérimentalement la fonction locomotrice. Le faible nombre de réalisations est dû à la difficulté de reproduire mécaniquement un corps continûment flexible. Actuellement, le robot-thon du M.I.T. est le plus abouti. Cette réplique mécanique a permis de mesurer la puissance consommée par les moteurs permettant de déformer le robot et ainsi de travailler sur la notion de rendement [12]. Ce modèle mécanique a aussi fait l'objet de simulations numériques [13, 14]. De manière générale, celles-ci ont connu un essor considérable durant la dernière décennie en profitant des possibilités offertes par l'informatique. Cependant, bien avant cela, bon nombre d'études théoriques sur la locomotion animale ont vu le jour en utilisant une modélisation simplifiée. On trouve notamment dans les années 60-70 des études sur la locomotion aquatique à faible nombre de Reynolds, dénommées *théories résistives*. Cette modélisation basée sur une approche quasi-statique où les termes instationnaires et les termes d'inertie sont négligés permet d'obtenir un système d'équations linéaires. Ce genre

d'approximation est licite dans le cas des petits poissons de l'ordre du millimètre. Mais cette modélisation est mise en défaut pour les poissons de taille « classique ». Une deuxième modélisation simplifiée, appelé *théorie réactive*, a été développée par Lighthill [15]. Dans ce cas, la viscosité du fluide n'est pas prise en compte, et les efforts s'exerçant sur le corps sont calculés à partir de bilans de quantité de mouvement. Cette formulation, (sans doute la plus connue en ce qui concerne l'hydrodynamique de la locomotion aquatique) est basée sur la théorie des corps allongés et utilise la notion de masse ajoutée. Elle fut au départ développée avec une hypothèse de petites déformations puis étendue à de larges amplitudes [16]. Ces théories simplifiées sont aujourd'hui quelque peu éclipsées par des modèles beaucoup plus complets mais demandant des ressources informatiques sans commune mesure. Au fil du développement des moyens de calculs, on constate d'ailleurs un raffinement des modèles utilisés. La plupart restent tout de même basés sur une approche fluide parfait. Numériquement, la méthode des panneaux (panel method) est souvent utilisée pour la résolution, comme en témoignent les simulations effectuées sur le robot-thon du M.I.T. [13, 14] et aussi celles issues de la thèse de Hill [17]. Celui-ci a d'ailleurs répertorié de manière détaillée les différents travaux s'appuyant sur une modélisation fluide parfait. Par contre, on ne recense que peu d'études mises en œuvre à partir de solveurs Navier-Stokes. Parmi les plus significatives, on peut citer les simulations de Liu et Kawashi réalisées à partir d'un code de calcul structuré sur une forme de têtard [18]. A noter que dans tous ces travaux, le mouvement du corps n'est pas résolu par le Principe Fondamental de la Dynamique mais il est imposé. Il n'y a donc pas véritablement de couplage. La seule étude mettant en jeu le couplage des équations de Navier-Stokes et la résolution du PFD est due à Carling [19]. Cependant, celle-ci était limitée à des simulations bidimensionnelles autour d'un corps très simplifié.

Du point de vue hydrodynamique, le paradoxe de Gray a aussi et surtout suscité un grand engouement pour la recherche de mécanismes de réduction de traînée : rôle du mucus, de la structure de l'exosquelette et de certains éléments rugueux dans la réduction de la traînée, étude des propriétés et des effets d'amortissement de la peau chez les cétagés, possible relaminarisation de la couche limite ou au contraire création et maintien d'une couche limite turbulente, ... Malgré les études réalisées, de nombreuses hypothèses sur les mécanismes de réduction de traînée sont encore à l'heure actuelle controversées et alimentent encore les discussions autour du fameux paradoxe. Presque 70 ans après, bien que des progrès indéniables aient été réalisés (aussi bien dans l'estimation de la puissance musculaire disponible que dans les efforts hydrodynamiques s'exerçant sur le corps), Triantafyllou affirmait récemment que la précision des mesures réalisables aussi bien dans le domaine de l'hydrodynamique que dans celui de la biologie ne permettait pas de le confirmer ou de le réfuter avec certitude [20]. Plus de dix ans auparavant, Blake indiquait au contraire que les performances des poissons pouvaient être élucidées dans la majorité des cas sans mécanismes particuliers de réduction de traînée [21]. Mais c'est surtout sur la question de la traînée visqueuse que les résultats sont les plus contradictoires. Conformément aux prédictions de Lighthill, des résultats expérimentaux semblent confirmer l'augmentation de la traînée visqueuse d'un poisson en mouvement par rapport à celle

d'un homologue rigide avançant à la même vitesse [11, 22]. D'autres travaux concluent à la tendance inverse. Barret rapporte dans [12] que dans certaines configurations, (notamment lorsque la célérité de l'ondulation du corps dépasse la vitesse de traction), la traînée visqueuse du robot-thon oscillant est nettement inférieure à celle du robot lorsque celui-ci est tracté sans se déformer. Notons toutefois que l'évaluation de la traînée du robot en mouvement est sujette à caution, étant donnée qu'il est impossible de la mesurer directement dans un tel dispositif expérimental. Des simulations principalement bidimensionnelles sur un profil ondulant ont permis à Chen et Doi d'effectuer des comparaisons au niveau de la structure de la couche limite de ce corps par rapport à son homologue rigide [23]. Ils ont constaté une réduction de la traînée visqueuse pour des régimes turbulents (tendance inverse pour les écoulements laminaires) pour des célérités d'ondes supérieures à la vitesse de l'écoulement. Ces résultats numériques corroborent d'ailleurs dans l'ensemble les constatations expérimentales de Tadona et Tomonari en 1974 sur une plaque plane ondulante [24]. Anderson note toutefois que l'augmentation de la traînée visqueuse par rapport au corps rigide « équivalent » n'est pas incompatible et n'empêche pas certains phénomènes locaux permettant de limiter cette augmentation et pouvant être assimilé à des mécanismes de réduction de traînée [11]. De toutes ces investigations, il semble tout de même se dégager quelques propositions convergentes sur les éventuels mécanismes de réduction de traînée. D'une part, ils ne se manifesteraient uniquement pour des célérités d'ondulation supérieures à la vitesse de déplacement du corps. Ils seraient attribuables à une baisse locale du niveau de turbulence voire à une relaminarisation, à la suppression des zones de séparation et/ou à un contrôle des tourbillons. D'autre part, toute la communauté scientifique s'accorde sur le fait que le nombre de Strouhal s'avère être un paramètre important dans l'efficacité de la propulsion.

II ■ DU SOLVEUR NAVIER-STOKES À LA NAGE DES POISSONS

● II.1 Le code de calcul ISIS

Le code ISIS est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes instationnaires en moyenne de Reynolds (RANSE) sous une forme fortement conservative pour des écoulements incompressibles et turbulents. Il repose sur une méthode volumes finis généralisée à des maillages non-structurés composés de volumes polyédriques arbitraires. La discrétisation spatiale et temporelle est formellement du deuxième ordre. Différents modèles de turbulence sont disponibles, allant de modèles basés sur le concept de viscosité turbulente (fermetures à une ou deux équations) jusqu'à des modèles de fermeture au second ordre, reposant sur la résolution des équations de transport des contraintes de Reynolds. Celui-ci offre la possibilité de simuler des écoulements avec surface libre par capture d'interface. Pour plus de détails sur les méthodes numériques utilisées, on pourra se reporter à la première partie de [25]. Des techniques de raffinement/agglomération de maillages ont été récemment implantées par A. Hay [26]. Un optimiseur a aussi été intégré au code par R. Duval [27]. Il est alors possible d'effectuer des calculs d'optimisation de forme ou de paramètres.

Le solveur Navier-Stokes ISIS a été étendu pour simuler les mouvements 3D d'un nombre quelconque de corps indéformables (solides) mais aussi déformables à déformation imposée (la forme du corps est alors imposée au cours du temps). Pour chaque corps, le mouvement peut être :

- imposé en donnant explicitement la loi d'évolution de la position du corps dans le repère physique,
- résolu à chaque pas de temps en couplant le calcul fluide avec le Principe Fondamental de la Dynamique (PFD) appliqué au corps. On impose alors uniquement le torseur cinématique initial du corps et éventuellement des actions mécaniques extérieures (autres que celles exercées par le fluide).

Nous avons également la possibilité de bloquer ou d'imposer le mouvement de certains degrés de liberté, ce qui permet de gérer d'éventuelles liaisons. Ces fonctionnalités permettent d'envisager de nombreuses applications dans le domaine de l'hydrodynamique, comme la tenue à la mer, le slamming, ... La mise en place des corps déformables nous a conduit à des applications tournées vers l'étude des solutions développées par les espèces vivantes au cours de leur évolution, à savoir le biomimétisme et plus particulièrement la biohydrodynamique. Les méthodes numériques employées concernant la résolution des équations du mouvement (paramétrage, utilisation d'un quaternion), les stratégies de remaillage pour la gestion du mouvement des corps ainsi que le couplage fluide-structure ne sont pas développées ici. Pour plus d'informations à ce sujet, on se reportera à [25].

● II.2 Le projet robot-anguille ROBEA

Suite à des premiers calculs validant les méthodes numériques employées et démontrant la capacité du code à reproduire la fonction locomotrice d'un poisson en imposant uniquement la forme de celui-ci au cours du temps, l'Equipe Modélisation Numérique a été intégrée dans le Projet Interdisciplinaire de Recherche initié par le CNRS et nommé ROBEA. Ce projet a pour objectif de concevoir et de réaliser un robot-anguille autopropulsé à locomotion anguilliforme. La partie simulation a pour objectif final de réaliser un modèle de contact fluide-structure. Les simulations de différents modes de nages vont servir à caler un modèle simple qui sera utilisé en temps réel pour la commande du robot.

III ■ LES PREMIÈRES SIMULATIONS ISSUES DU CODE ISIS

● III.1 La géométrie et le maillage

Le projet étant seulement à son stade initial, les premiers calculs ont été effectués sur une géométrie provisoire (voir *figure 1*), la forme et la longueur finale du robot n'étant pas encore complètement définies. Pour le moment, les simulations ont été effectuées sur un corps d'un mètre, alors que le prototype final approchera les 2 mètres. Deux maillages ont été créés. Le premier, noté M65e3, est adapté aux modèles de turbulence de type loi de paroi. Il possède 65 000 cellules. Le deuxième, noté M12e4, contient 120 000 cellules. Il est utilisé pour les modèles de turbulence proche paroi. Le mouvement étant plan, le domaine de calcul est limité au demi-espace supérieur avec une condition de symétrie sur le plan $z = 0$ (voir *figure 2*).

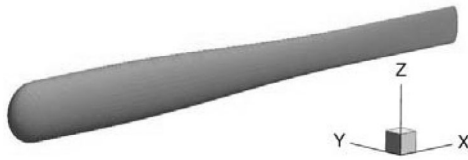


Figure 1 : Vue globale de la forme provisoire du robot.

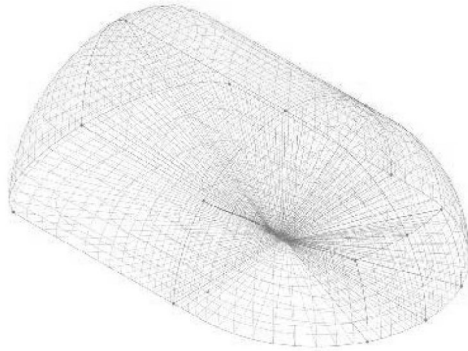


Figure 2 : Vue d'ensemble du domaine de calcul (maillage M65e3).

● III.2 Les lois de déformation imposée

Ces lois analytiques ont pour objectif d'imposer la forme du poisson au cours du temps dans un repère où la position et l'orientation de la tête sont fixées. Rappelons ici que la position de ce repère dans l'espace est résolue simultanément à l'écoulement.

III.2.1 Régime d'avance périodique (loi AvP)

Dans cette configuration (voir figure 3), la courbure notée c_F est définie par l'équation (1). Elle est régie par une fonction sinusoïdale modulée en amplitude selon l'abscisse curviligne s . L'amplitude est définie par une fonction polynôme $A(s)$. L'objectif de cette loi est d'atteindre un état périodique. Ainsi, pour éviter un transitoire trop long, les corps peuvent être lancés avec une vitesse initiale. En début de simulation, la loi de déformation est prescrite progressive-

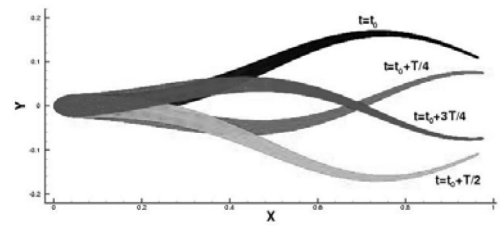


Figure 3 : Forme imposée dans le repère de déformation (loi AvP).

ment en pondérant la courbure par un coefficient de relaxation qui passe régulièrement de 0 à 1 au bout de n_p périodes.

$$c_F(s, t) = A(s) \cdot \sin\left[2\pi \cdot \left(\frac{s}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right], \quad (1)$$

avec $A(s) = A_2 \cdot s^2 + A_1 \cdot s + A_0$

Les paramètres caractéristiques sont donc :

- la longueur d'onde λ ,
- la période T ,
- les coefficients du polynôme A_0, A_1, A_2 .

III.2.2 Loi de virage (loi Vir)

Cette loi est déterminée simplement par un rayon de courbure constant R_T (voir équation (2)). Avant et après le virage, un régime d'avance normal est prescrit.

Durant un virage sans propulsion, $\alpha(t)$ reste nul. Deux phases transitoires « début » et « fin » de virage permettent une évolution régulière de α respectivement entre 0 et 1, et entre 1 et 0 (voir figure 4). La loi de virage est donc décomposée en 3 phases, détaillées dans le tableau 1.

$$c_T(s, t) = \alpha(t) \cdot c_F(s, t) + \frac{1 - \alpha(t)}{R_T} \quad (2)$$

Tableau 1 : Définition des 3 phases de la loi de virage.

| Phase | P1 : début du virage | P2 : virage | P3 : fin du virage |
|-------------|----------------------|----------------|--------------------|
| durée | $\alpha_{T1}T$ | $\alpha_{T2}T$ | $\alpha_{T3}T$ |
| $\alpha(t)$ | $1 \rightarrow 0$ | 0 | $0 \rightarrow 1$ |

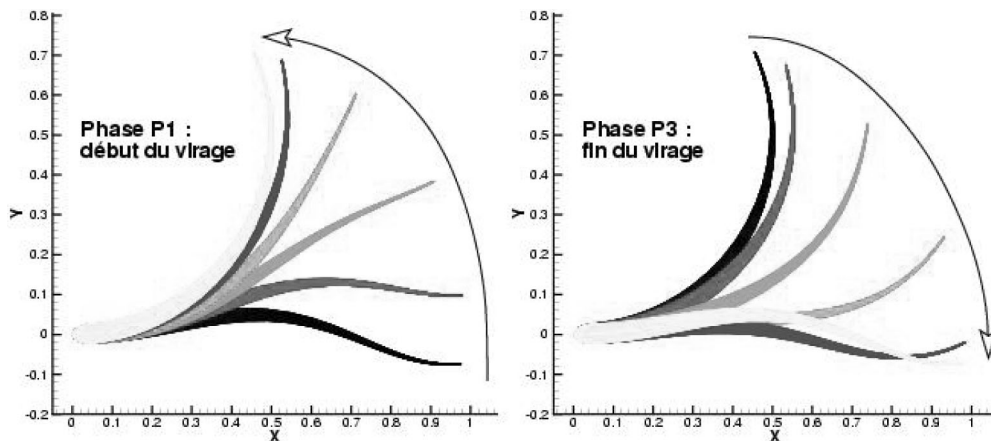


Figure 4 : Visualisation des deux phases transitoires de la loi de virage.

● III.3 Les résultats

Pour le moment, une loi d'avance et deux lois de virage ont été simulées. Les différents paramètres sont donnés dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Paramètres des différentes lois de déformation.

| Loi | λ | T | A_2 | A_1 | A_0 | R_T | α_{T1} | α_{T2} | α_{T3} |
|------|-----------|-----|-------|-------|-------|-------|---------------|---------------|---------------|
| AvP | 1 | 1 | 2 | 0,5 | 1 | - | - | - | - |
| Vir1 | 1 | 1 | 2 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| Vir2 | 1 | 1 | 2 | 0,5 | 1 | 0,5 | 0,5 | 1 | 0,5 |

La direction d'avance du robot est $-\vec{X}$. Une vitesse initiale de $-0,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ est imposée. Au début de la simulation, l'état transitoire génère une petite rotation du corps (environ 2°). Celle-ci est alors conservée lorsque l'état périodique est atteint

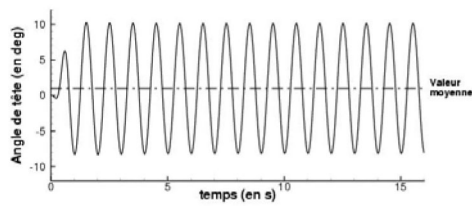


Figure 5 : Evolution de l'angle de tête.

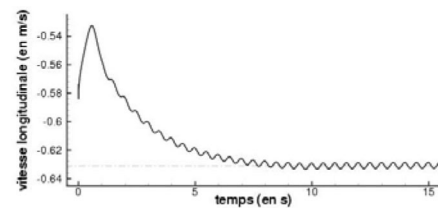


Figure 6 : Evolution de la vitesse longitudinale de tête.

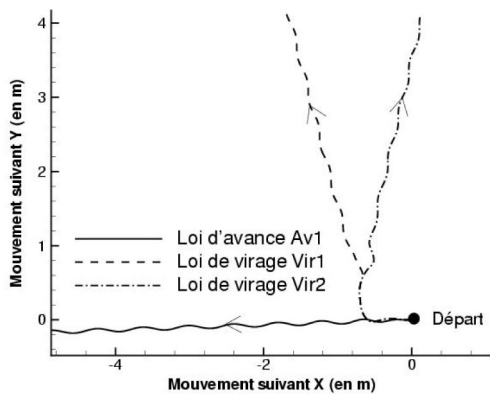


Figure 7 : Evolution de la position de la tête.

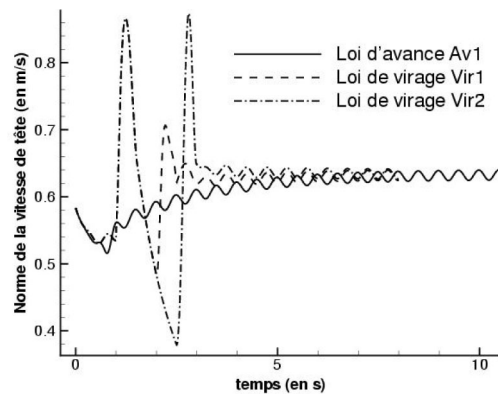


Figure 8 : Evolution de la vitesse de tête.

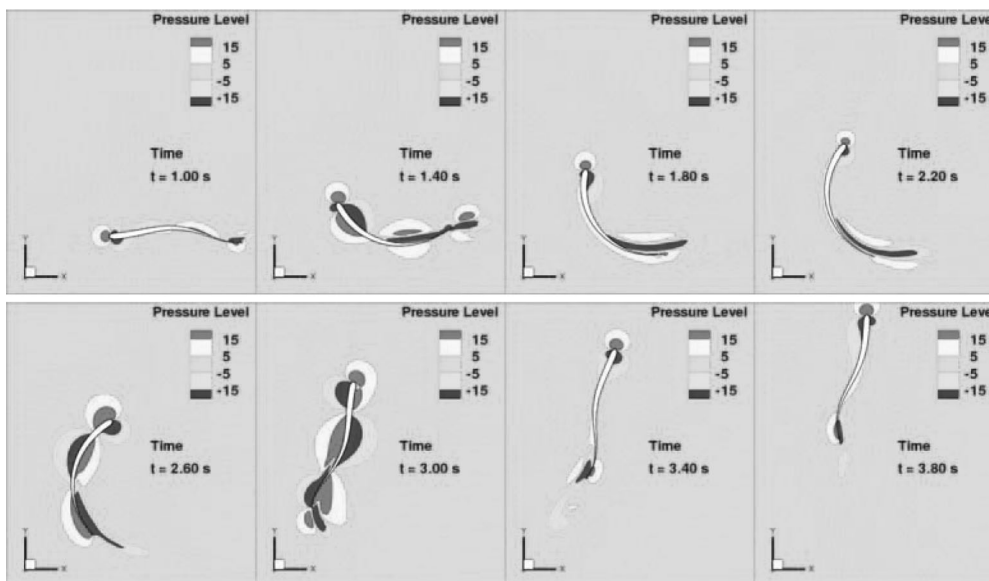


Figure 9 : Evolution du champ de pression en $z = 0$ (loi Vir2).

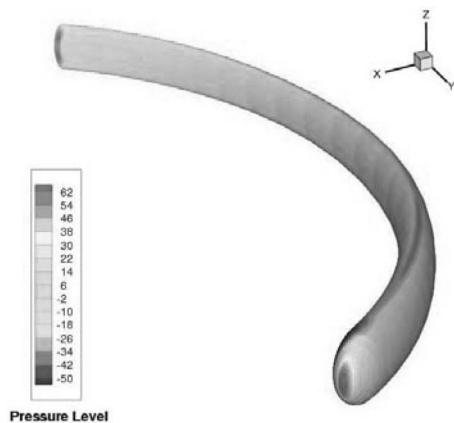


Figure 10 : Vue 3D du champ de pression sur le corps à $t = 2,5$ s (loi Vir2).

IV ■ BILAN ET PERSPECTIVES

Que le paradoxe de Gray soit aujourd'hui résolu ou pas n'enlève rien à la mobilité harmonieuse des espèces aquatiques. L'efficacité et la formidable manœuvrabilité de leur fonction locomotrice développée au fil de leur évolution constituent encore pour les mécaniciens des fluides un formidable champ d'application, comme en témoignent les nombreuses études sur le sujet. Le développement exceptionnel des moyens de calcul et de stockage tant dans le domaine des super-calculateurs que des simples PC durant les deux dernières décennies ainsi que la maturité atteinte par les algorithmes de résolution permettent aujourd'hui d'envisager des simulations plus réalistes, par exemple en couplant la résolution des équations de Navier-Stokes avec de nouveaux phénomènes physiques.

L'étude d'écoulements réels autour de corps en mouvement fait partie de ces nouvelles applications qui deviennent désormais abordables en terme de temps de calcul, même sur des configurations tridimensionnelles. Les nouvelles méthodologies liées aux mouvements de corps mises en place dans le code ISIS permettent d'effectuer des simulations autour de véritables « poissons numériques » en imposant uniquement leur forme au cours du temps. Ces calculs donnent accès à des quantités difficilement mesurables sur des spécimens vivants (traînée, rendement, ...). L'optimisation des paramètres des lois de forme imposées pourra aussi conduire à l'avenir à une meilleure compréhension des mécanismes physiques. Explorer, analyser et s'appropriier les différentes solutions offertes par la Nature représente un des objectifs du biomimétisme. En ce qui nous concerne plus particulièrement, la variété des solutions adoptées par les différentes espèces (forme, cinématique, type de peau, performances, ...) ne facilite pas une approche synthétique. Outre l'émerveillement et l'admiration que peut susciter la biohydrodynamique pour ces maîtres dans l'art de la locomotion aquatique, le monde aquatique n'apparaît pas à l'heure actuelle si limpide. Encore peut-on espérer que pour une fois l'activité humaine permettra de rendre l'eau plus claire et que ces études parviendront à améliorer les solutions retenues pour la conception des engins marins.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HOUSSAY S.F. (1912). — *Forme, Puissance et Stabilité des Poissons*. Paris : A. Hermann et fils.
- [2] BREDER C.M. (1926). — "The locomotion of fishes", *Zoologica (N.Y.)* vol. 4(5), pp. 159-297.
- [3] VIDELER J.J. and HESS F. (1998). — "Fast continuous swimming of two pelagic predators, saithe and mackerel: a kinematic analysis", *Journal of Experimental Biology*, vol. 201, pp. 1505-1526.
- [4] VIDELER J.J. (1993). — *Fish Swimming*. Chapman and Hall, Fish and Fisheries Series 10.
- [5] GRAY J. (1932). — "Study In Animal Locomotion I- The movement of the fish with special reference to the eel", *Journal of Experimental Biology*, vol. 10, pp. 88-104.
- [6] HENDERSON Y. and HAGGARD H.W. (1925). — "The maximum of human power and its fuel", *American Journal of Physiology*, vol. 72, pp. 264-282.
- [7] GRAY J. (1936). — "Study In Animal Locomotion IV- The propulsive powers of the dolphins", *Journal of Experimental Biology*, vol. 13, pp. 192-199.
- [8] VIDELER J.J., MÜLLER U.K. and STAMHUIS E.J. (1999). — "Aquatic vertebrate locomotion: wakes from body waves", *Journal of Experimental Biology*, vol. 202, pp. 3423-3430.
- [9] MÜLLER U.K., SMIT J., STAMHUIS E.J. and VIDELER J.J. (2001). — "How the body contributes to the wake in undulatory fish swimming: flows fields of a swimming eel", *Journal of Experimental Biology*, vol. 204, pp. 2751-2762.
- [10] NAUEN J.C. and LAUDER G.V. (2002). — "Hydrodynamics of caudal fin locomotion by chub mackerel, *Scomber japonicus* (Scombridae)", *Journal of Experimental Biology*, vol. 205, pp. 1709-1724.
- [11] ANDERSON E.J., MCGILLIS W.R. and GROSENBAUGH M.A. (2000). — "The boundary layer of swimming fish", *Journal of Experimental Biology*, vol. 204, pp. 81-102.
- [12] BARRET D.S., TRIANTAFYLLOU M.S., YUE D.K.P., GROSENBAUGH M.A. and WOLFGANG M.J. (1999). — "Drag reduction in fish-like locomotion", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 392, pp. 183-212.
- [13] ZHU Q., WOLFGANG M.J., YUE D.K.P. and TRIANTAFYLLOU M.S. (2002). — "Three-dimensional flow structures and vorticity control in fish-like swimming", *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 468, pp. 1-28.
- [14] WOLFGANG M.J., ANDERSON J.M., GROSENBAUGH M.A., YUE D.K.P. and TRIANTAFYLLOU M.S. (1999). — "Near-body flow dynamics in swimming fish", *Journal of Experimental Biology*, vol. 202, pp. 2303-2327.
- [15] LIGHTHILL M.J. (1969). — "Hydromechanics of aquatic animal locomotion", *Annual review of Fluid Mechanics*, vol. 1, pp. 413-446.
- [16] LIGHTHILL M.J. (July 1971). — "Large-amplitude elongated-body theory of fish locomotion", in *Proceedings of the Royal Society*, 125B, (London), pp. 125-138.
- [17] HILL S.H. (1998). — *Large Amplitude Fish Swimming*. PhD thesis, University of Leeds, Department of Applied Mathematics, United Kingdom.
- [18] LIU H. and KAWACHI K. (1999). — "A numerical study of undulatory swimming", *Journal of Computational Physics*, vol. 155, pp. 223-247.
- [19] CARLING J., WILLIAMS T.L. and BOWTELL G. (1998). — "Self-propelled anguilliform swimming: simultaneous solution of the two-dimensional Navier-Stokes equations and Newton's laws of motion", *Journal of Experimental Biology*, vol. 201, pp. 3143-3166.

- [20] TRIANTAFYLLOU M.S. and TRIANTAFYLLOU G.S. (1995). — “An efficient swimming machine”, *Scientific American*, vol. 272, pp. 64-70.
- [21] BLAKE R.W. (1982). — *Fish Locomotion*. Cambridge University Press.
- [22] FISH F.E. (1993). — “Power output and propulsive efficiency of swimming bottlenose dolphins”, *Journal of Experimental Biology*, vol. 185, pp. 173-193.
- [23] CHEN Z. and DOI Y. (July 2002). — “Numerical study on propulsion by undulating motion in laminar-turbulent flow”, in *24th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Fukuoka Japan.
- [24] TADENA S. and TOMONARI Y. (1974). — “An experiment on the flow around a waving plate”, *Journal of the Physical Society of Japan*, vol. 36, pp. 1683-1689.
- [25] LEROYER A. (2004). — Etude du couplage écoulement/mouvement pour des corps solides ou à déformation imposée par résolution des équations de Navier-Stokes. Contribution à la modélisation numérique de la cavitation. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [26] HAY A. (2004). — Etude des stratégies d'estimation d'erreur numérique et d'adaptation locale de maillages non-structurés pour les équations de Navier-Stokes en moyenne de Reynolds. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.
- [27] DUVIGNEAU R. (2002). — Contribution à l'optimisation de forme pour des écoulements à forts nombres de Reynolds autour de géométries complexes. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes.