

# Préface

## La simulation numérique, un enjeu stratégique pour notre souveraineté industrielle

**Hervé GRANDJEAN**

*Ingénieur en chef de l'armement,  
porte-parole du ministère des Armées, Paris, France*

En décembre 2020, le président de la République décidait avec Florence Parly, ministre des Armées, de doter le prochain porte-avions français d'une propulsion nucléaire. Quelques mois seulement plus tard, la première pièce de ce futur porte-avions – 270 tonnes tout de même ! – sortait des forges du Creusot. Quelque 75 000 tonnes restent encore à produire avant d'achever, d'ici la fin de la prochaine décennie, la construction du futur navire amiral de la Marine nationale, qui naviguera alors pendant près de quarante ans.

Les dimensions d'un tel navire, ses performances, sa longévité illustrent ce qui fait la beauté du domaine naval pour des ingénieurs : sa complexité ! Qu'il s'agisse de mécanique des fluides ou des structures, d'optronique, de théorie des ondes, de sûreté de fonctionnement, d'ergonomie, etc., concevoir un navire nécessite de recourir à de multiples sciences, de les conjuguer, d'identifier les contraintes d'intégration, pour finalement proposer une esquisse qui satisfera les besoins des équipages. Lorsqu'il s'agit d'assembler sur une même plateforme des centrales nucléaires, une base aérienne, un hôpital, et de quoi faire fonctionner une ville de 2 000 habitants en autonomie pendant plusieurs mois, on prend la mesure que le terme de « génie naval » n'est pas usurpé !

À la différence des véhicules terrestres ou des aéronefs, les effets de série sont très limités dans le domaine naval. Par ailleurs, le gigantisme des projets ne permet pas d'envisager la construction de prototypes de porte-avions, de sous-marins ou de paquebots : il

*Interactions fluide-structure,*

coordonné par Jean-François SIGRIST et Cédric LEBLOND. © ISTE Editions 2022.

faut donc faire bien *du premier coup* ! Et c'est dans une large mesure aussi vrai pour des hydroliennes ou de grandes pompes industrielles. La simulation numérique est donc devenue le cœur de la conception des systèmes complexes. Que ce soit pour estimer les performances manœuvrières d'un navire, la fatigue de la poutre-navire après des dizaines de milliers d'heures de mer, ou le bruit rayonné sous l'eau par une structure en mouvement, seule la simulation numérique permet de tester rapidement un grand nombre de configurations et de concevoir un système qui satisfasse aux exigences de l'utilisateur, en termes de performances, de coût, et de conformité aux règlements. Les essais sur maquette restent bien sûr essentiels, notamment pour évaluer les problèmes physiques les plus arides, mais ils arrivent au bout d'un chemin numérique qui aura largement défriché le champ des possibles.

Il est donc essentiel pour les acteurs du monde maritime, qu'ils soient industriels en charge d'imaginer et de construire des produits – bureaux d'études, chantiers navals – ou clients et fournisseurs – armateurs, direction générale de l'armement, *supply chain* – de comprendre les ressorts de la simulation numérique, d'appréhender sa puissance mais aussi de cerner ses limites.

L'ouvrage que vous tenez entre les mains constitue à cet égard une contribution essentielle, à la fois érudite et accessible. Fruit des travaux de personnalités académiques et du monde industriel, tous scientifiques de grand talent, il couple une approche théorique et une approche métier, indispensables pour aborder la conception des systèmes navals. Il donnera aux étudiants et aux publics avertis, professionnels ou amateurs, un panorama des techniques les plus récentes en matière de simulation numérique pour l'interaction fluide-structure, qui leur sera concrètement utile pour devenir, à leur tour, les architectes des grands projets industriels de la France.

# Avant-propos

## Interactions fluide-structure en ingénierie navale

Jean-François SGRIST<sup>1</sup> et Cédric LEBLOND<sup>2</sup>

<sup>1</sup> DGA, Tours, France

<sup>2</sup> Naval Group, Bouguenais, France

Publié en 1870, au siècle qui a vu se formaliser les équations régissant les écoulements de fluides (Navier 1823 ; Cauchy 1829 ; Reynolds 1883 ; Stokes 1845), *Vingt mille lieues sous les mers* est l'une des œuvres les plus connues de l'écrivain français Jules Verne (1828-1905). Comptant également de nos jours parmi la vingtaine de livres les plus vendus au monde, elle a donné lieu à de nombreuses adaptations au cinéma, à la télévision ou en bande dessinée. Le professeur Aronnax, éminent expert du Muséum d'Histoire naturelle de Paris, son domestique Conseil et Ned Land, marin expérimenté et harponneur chevronné, embarquent à bord de l'*Abraham Lincoln*, engageant la recherche d'un monstre marin. La bête extraordinaire est en réalité une machine d'acier et d'électricité : le *Nautilus*, formidable engin imaginé, construit et commandé par le capitaine Nemo afin de régner en maître dans le monde sous-marin. Au cours de leur long séjour à bord du submersible, les trois héros du roman vont découvrir des paysages magnifiques et vivre des aventures incroyables. Ils mesureront l'immensité de l'océan, de ses ressources et de ses richesses. Cette odysée, qui leur fera parcourir plus de vingt mille lieues sous les mers, sera un voyage de rêve et de découvertes pour le professeur Aronnax, mais une prison dorée pour Ned Land, épris de la liberté qu'offre la navigation de surface. Verne prête ces mots au capitaine Nemo :

« Si tout est danger sur un de vos navires soumis aux hasards de l'Océan, si sur cette mer, la première impression est le sentiment de l'abîme, comme l'a si bien dit le Hollandais Jansen, au-dessous et à bord du *Nautilus*,

*Interactions fluide-structure,*

coordonné par Jean-François SGRIST et Cédric LEBLOND. © ISTE Editions 2022.

le cœur de l'homme n'a plus rien à redouter. Pas de déformation à craindre, car la double coque de ce bateau a la rigidité du fer ; pas de gréement que le roulis ou le tangage fatiguent ; pas de voiles que le vent emporte ; pas de chaudières que la vapeur déchire ; pas d'incendie à redouter, puisque cet appareil est fait de tôle et non de bois; pas de charbon qui s'épuise, puisque l'électricité est son agent mécanique ; pas de rencontre à redouter, puisqu'il est seul à naviguer dans les eaux profondes ; pas de tempête à braver, puisqu'il trouve à quelques mètres au-dessous des eaux l'absolue tranquillité ! Voilà, monsieur. Voilà le navire par excellence ! Et s'il est vrai que l'ingénieur ait plus de confiance dans le bâtiment que le constructeur, et le constructeur plus que le capitaine lui-même, comprenez donc avec quel abandon je me fie à mon *Nautilus*, puisque j'en suis tout à la fois le capitaine, le constructeur et l'ingénieur ! » (Verne 1870)

Comment concrétiser le rêve du capitaine Nemo ? Comment concevoir un navire aussi complexe qu'un sous-marin (Laisney 2012 ; Bovis 2016) et assurer à son équipage qu'il leur permettra une navigation sûre, dans des conditions de mer difficiles ou durant des opérations délicates ?



**Figure A.1.** Le sous-marin, ici le SNLE « Le Triomphant », est l'une des constructions mécaniques les plus complexes (source : (Lebourdais 2019))

Les ingénieurs du XXI<sup>e</sup> siècle ont à leur disposition l'expérience et le savoir-faire de ceux qui les ont précédés, leur sens physique et la somme de leurs connaissances techniques (Griset 2017). D'autres outils sont aussi disponibles, ceux de la [simulation numérique](#) en particulier.

Fondée sur le postulat qu'il est possible de rendre compte de phénomènes physiques – ou autres (biologiques, économiques, démographiques, physiologiques, etc.) – au moyen de modèles mathématiques, la simulation numérique s'impose aujourd'hui dans le monde industriel et dans de nombreuses disciplines scientifiques (Sigrist 2019). Elle contribue fortement à l'innovation de ce secteur, en répondant à deux objectifs principaux :

- la maîtrise des risques techniques. Elle permet la constitution de dossiers réglementaires, la démonstration de sécurité et de fiabilité, l'élaboration d'études d'impact environnemental, etc. ;
- la performance économique. Elle concourt à l'optimisation des produits, à la démonstration de leur robustesse, à la prédiction de leurs performances ou à la réduction de leur coût de fabrication et d'utilisation.

Si les simulations numériques en mécanique des structures et des fluides accompagnent de longue date les programmes de construction de navires militaires ou civils (Besnier 2006), la modélisation des interactions fluide-structure en génie naval est, elle, plus récente. Celle-ci est par ailleurs bien formalisée et documentée dans divers ouvrages de référence (Morand et Ohayon 1998 ; Sigrist 2015), qui concernent de nombreuses applications, du génie nucléaire au génie civil (Paidoussis 2004 ; Axisa 2007 ; Paidoussis *et al.* 2011), en passant par la construction aéronautique, spatiale ou automobile (Ohayon et Soize 1998 ; Bazilevs *et al.* 2012 ; Souli et Benson 2013 ; Ohayon et Soize 2014) ou la biomécanique (Murea 2017).

L'objectif du présent ouvrage est de contribuer à étoffer les connaissances des modèles permettant la simulation des interactions fluide-structure pour des applications intéressant le domaine naval. Ces modélisations couvrent ainsi trois domaines :

- le rayonnement acoustique des plateformes marines et des profils portants ;
- l'hydrodynamique des plateformes marines et des profils portants ;
- le comportement vibratoire de structures immergées en réponse directe ou indirecte aux effets d'une explosion sous-marine.

L'ouvrage est constitué de onze chapitres, qui abordent diverses modélisations (numériques, semi-analytiques, empiriques), méthodes de calcul (éléments finis, éléments de frontière, volumes finis) et approches numériques (modèles d'ordre réduit, stratégie de couplage, etc.).

Le chapitre 1 propose une introduction à la thématique des interactions fluide-structure sous un angle historique, en évoquant succinctement les principales étapes de construction des modèles de l'hydrodynamique.

Les chapitres 2, 3 et 4 abordent la thématique de la « vibro-acoustique » :

- le chapitre 2 rappelle les principes des modélisations en éléments finis, permettant le calcul des vibrations « basses fréquences » des structures immergées ;

- le chapitre 3 prolonge le précédent et expose les bases des modélisations vibro-acoustiques « hybrides », autorisant l'extension des calculs de vibrations au domaine des « moyennes fréquences » ;

- le chapitre 4 complète ces deux exposés en évoquant des techniques « vibro-acoustiques » émergentes, visant par exemple à prendre en compte des chargements complexes ainsi que les incertitudes sur les données de conception et les variables d'environnement – ces techniques se fondant en particulier sur des méthodes de réduction de modèle.

Les chapitres 5 et 6 poursuivent l'exploration de techniques de réduction de modèle ou de temps de calcul :

- le chapitre 5 présente les bases théoriques des méthodes POD (*Proper Orthogonal Decomposition*) et LBM (*Lattice Boltzmann Method*) formulées dans le cas de l'IFS pour des problèmes d'hydrodynamique et de mouvements de structures sous écoulement ;

- le chapitre 6 propose une synthèse sur la modélisation des IFS dans le comportement vibratoire de faisceaux tubulaires (présents dans les systèmes de propulsion des sous-marins nucléaires) contenant des fluides, avec des techniques d'homogénéisation.

Les chapitres 7, 8 et 9 traitent de la modélisation du chargement hydrodynamique sur les structures immergées et de la réponse dynamique de ces dernières :

- le chapitre 7 traite de la modélisation des spectres de pression engendrée par la turbulence des écoulements en contact avec les structures (tels les carènes, les appendices de coque, les pales d'hélices, etc.). La modélisation proposée allie modèles théoriques, données empiriques et calcul numérique ;

- le chapitre 8 s'intéresse au calcul du comportement mécanique de structures déformables (comme des profils portants constitués de matériaux souples, en composite, par exemple) sous l'effet du chargement hydrodynamique. La modélisation s'appuie sur des techniques dites de « co-simulation », exploitant le couplage entre un code de dynamique des structures et de dynamique des fluides ;

- le chapitre 9 traite des problématiques de tenue à la mer des plateformes : il expose les modélisations de leur comportement en réponse aux chargements hydrodynamiques de houle.

Les chapitres 10 et 11 concernent la réponse de structures immergées aux effets d'une explosion sous-marine :

– le chapitre 10 s'intéresse à la modélisation analytique du problème couplé pour des sous-marins. Cette approche, si elle simplifie la réalité – en particulier la géométrie des navires –, permet en revanche de réaliser très rapidement des études paramétriques, ce qui s'avère utile aux concepteurs et architectes ;

– le chapitre 11 traite de la modélisation de structures composites immergées et de leur comportement sous l'effet du chargement dû à l'explosion ; la modélisation proposée conjugue des approches analytiques et numériques, adaptées aux difficultés que pose la représentation des composites.

Rédigé par un collectif d'experts confirmés et de jeunes chercheurs du secteur naval, cet ouvrage s'adresse avant tout à leurs pairs, élèves ingénieurs comme ingénieurs de recherche ou de conception, qui souhaiteraient disposer d'une vue d'ensemble sur diverses thématiques techniques (hydrodynamique, tenue à la mer, bruits, vibrations). L'exposé, qui se veut à la fois fluide et synthétique, montrera au lecteur, à travers différents exemples, comment la simulation numérique contribue à modéliser et comprendre les interactions fluide-structure, dans le but de concevoir et optimiser les navires de demain – en un mot, concrétiser les paroles de Jules Verne : « Tout ce qu'un homme est capable d'imaginer, d'autres hommes sont capables de le réaliser ! »

## Bibliographie

- Axisa, F. (2007). *Modelling of Mechanical Systems – Fluid-Structure Interaction*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Bazilevs, Y., Takizawa, K., Tezduyar, T.-E. (2012). *Computational Fluid – Structure Interaction: Methods and Applications*. Wiley, New York.
- Besnier, F. (2006). Simulation numérique et conception des structures de grands navires. *Mécanique & Industries*, 7, 213–221.
- Bovis, A. (2016). *La technologie sous-marine*. Heimdal, Paris.
- Cauchy, A.-L. (1829). Sur l'équilibre et le mouvement des liquides et des fluides élastiques. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 11, 413–416.
- Griset, P. (2017). *400 ans d'innovation navale*. Nouveau monde éditions, Paris.
- Laisney, A. (2012). *Le Redoutable et l'histoire des techniques des sous-marins*. Marines éditions, Rennes.
- Lebourdaïs, E. (2019). *S.U.B. Des images à l'West* éditions, Brest.
- Navier, H. (1823). Sur les lois du mouvement des fluides. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences*, 6, 389–416.

- Morand, H. J.-P., Ohayon, R. (1998). *Fluid-Structure Interaction*. Wiley, New York.
- Murea, C.M. (2017). *Stable Numerical Schemes for Fluids, Structures and their Interactions*. ISTE Ltd, Londres, Elsevier, Amsterdam.
- Ohayon, R., Soize, C. (1998). *Structural Acoustic and Vibration*. Academic Press, Cambridge.
- Ohayon, R., Soize, C. (2014). *Advanced Computational Vibroacoustics. Reduced-Order-Models and Uncertainty Quantification*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Paidoussis, M. (2004) *Fluid-Structure Interactions: Slender Structures and Axial Flow*. Cambridge Academic Press, Cambridge.
- Paidoussis, M., Price, S., de Langre, E. (2011). *Fluid-Structure Interactions. Cross-Flow-Induced Instabilities*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Reynolds, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and the law of resistance in parallel channels. *Proceedings of the Royal Society*, 35, 84–99.
- Sigrist, J.-F. (2015). *Fluid-Structure Interaction – An Introduction to Finite Element Coupling*. Wiley, New York.
- Sigrist, J.-F. (2019). *La simulation numérique*. ISTE Editions, Londres.
- Souli, M., Benson, D. (2013). *Arbitrary Lagrangian Eulerian and Fluid-Structure Interaction: Methods and Applications*. ISTE Ltd, Londres, Wiley, New York.
- Stokes, G.-C. (1945). On some causes of fluid motion. *Transaction of Cambridge Philosophical Society*, 6, 287–305.
- Verne, J. (1870). *Vingt mille lieues sous les mers*. Hetzel, Paris.