

RESEARCH

LA SCIENCE AU SERVICE
DE L'INNOVATION NAVALE

SOMMAIRE

01

UNE RECHERCHE COLLABORATIVE

#9

Laboratoires communs : coopérer avec la recherche académique pour préparer l'avenir

#14

Partenariat Naval Group CNRS : voir plus loin, voir plus large

02

DES SUJETS ÉMERGENTS ET STRUCTURANTS

#17

La révolution numérique au service de la conception de sous-marins

#20

L'Intelligence Artificielle pour la marine de Défense

03

ILS FONT LA SCIENCE À NAVAL GROUP

#27

Parole de doctorant

#30

Parole d'expert

FOCUS

#34-35

LE CONSEIL SCIENTIFIQUE DE NAVAL GROUP

04

MÉCANIQUE DES FLUIDES

#37

Des modèles ultra-puissants pour optimiser la propulsion des sous-marins

#40

Mieux comprendre les phénomènes de turbulence pour une meilleure discrétion acoustique

#46

Modéliser la houle et ses impacts pour mieux dimensionner les structures

06

MATÉRIAUX & STRUCTURES

#61

L'hélice en composite, une innovation qui fait son chemin

#66

Comment concevoir des navires de défense plus « verts » ?

05

INTERACTIONS ONDES/MATIÈRE

#53

Des modélisations vibro-acoustiques au plus près de la structure réelle des navires

#56

Comprendre, prédire et limiter le bruit d'écoulement autour d'un sous-marin

AVANT - PROPOS

GARDER LE CAP POUR ACCÉLÉRER L'INNOVATION



Lors de ses vœux aux armées, début 2022, la ministre des Armées a présenté les grands axes de la politique de défense, avec un mot d'ordre : **se préparer pour pouvoir faire face aux conflits du futur, en misant notamment sur l'anticipation et l'adaptation des moyens d'action**. Il s'agit, pour reprendre ses termes, de « *rester à la pointe des technologies d'avenir, avec des projets capacitaires ambitieux, une base industrielle et technologique de défense européenne forte, et une capacité d'innovation renouvelée* ».

L'innovation est au cœur de la stratégie de Naval Group. Nous devons être à la hauteur des défis exprimés dans la loi de programmation militaire, en levant les verrous technologiques et en contribuant à des activités de recherche de haut niveau. Nous ne cessons d'innover à tous les stades de la vie d'un navire, de sa conception à sa déconstruction, en passant par sa construction et sa maintenance. Une seule ambition anime nos équipes : celle de contribuer à la disponibilité et à la supériorité opérationnelle des forces navales.

La 5^e édition des *Naval Innovation Days*, en octobre 2021, a fourni un éclairage de nos enjeux stratégiques et des défis à relever. **Pour capter le meilleur de l'innovation, Naval Group se positionne aujourd'hui sur de multiples chantiers**, comme la maîtrise de la complexité, indispensable pour le combat collaboratif naval, la furtivité, la performance énergétique... Nos équipes sont pleinement engagées sur l'intégration fonctionnelle et physique des drones à la force navale, dont l'un des principaux défis est l'autonomie décisionnelle contrôlée, sur le développement d'algorithmes pour l'aide à la manœuvre tactique des sous-marins, sur la performance des navires grâce à des solutions composites, sur l'optimisation énergétique et l'hybridation des architectures énergie-propulsion ou encore sur la cybersécurité.

Naval Group en est convaincu : la recherche est indispensable pour préparer l'avenir. Nous devons avancer voire accélérer sur des sujets académiques de premier plan, en lien avec nos problématiques techniques et industrielles. Si nous maintenons notre avance sur des sujets « historiques », comme la science des matériaux, nos experts et chercheurs s'attachent aussi à intégrer les développements rapides, actuels, en intelligence artificielle ou à défricher des sujets émergents comme le quantique. Ces travaux, qui contribuent à l'innovation d'aujourd'hui et de demain, représentent la colonne vertébrale de nos ambitions : **conserver une longueur d'avance différenciante dans l'industrie navale ; garantir la supériorité technologique et opérationnelle de nos clients, sur tous les océans ; et améliorer notre compétitivité, condition de notre leadership sur tous les continents.** La stratégie globale d'innovation de Naval Group se décline ainsi au travers des six axes fédérateurs : navire invulnérable (*Invulnerable Ship*), navire intelligent (*Smart Ship*), combat aéromaritime collaboratif (*Smart Naval Force*), maintien de la supériorité opérationnelle au combat (*Smart Availability*), autonomie, écoconception et performance énergétique des navires (*Blue Ship*), et industrie navale du futur (*Smart Industry*).

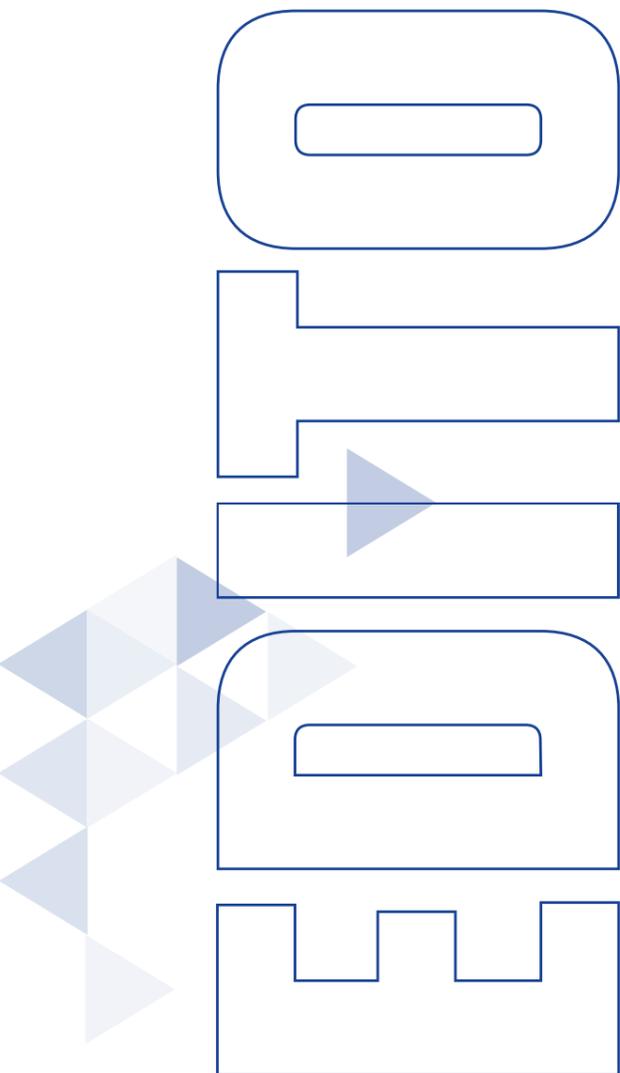
La recherche et l'innovation nécessitent des expertises de pointe, celles de la communauté scientifique de Naval Group en premier lieu. Elles répondent aux standards académiques les plus élevés et participent à notre rayonnement international grâce à leurs publications et leurs interventions dans des colloques. L'accueil de doctorants en thèse CIFRE, de plus en plus nombreux, participe également au dynamisme de notre recherche.

La qualité de la recherche dépend aussi des partenariats scientifiques que nous développons en France et à l'international dans une dynamique d'open innovation : accords de coopération en matière de recherche avec le monde académique ainsi que de grands centres étatiques, accords de co-innovation avec des industriels, développement de centres d'excellence R&D à l'étranger, etc.

Notre Conseil scientifique soutient également l'esprit d'innovation du groupe en fournissant des avis sur nos orientations scientifiques, en pilotant des groupes de travail sur des sujets fortement transformants, en contribuant activement à la reconnaissance des compétences scientifiques internes, en nous connectant à des réseaux scientifiques, ainsi qu'en animant le prix scientifique La Pérouse.

Notre activité de recherche nous permet d'anticiper les ruptures technologiques de demain et de préparer l'avenir. Elle est alignée avec les besoins capacitaires de nos clients. Gardons le cap et accélérons, en nous appuyant sur nos talents internes, mais également en faisant appel au soutien actif de nos partenaires académiques et industriels.

Pierre Éric Pommelot,
Président-Directeur général de Naval Group



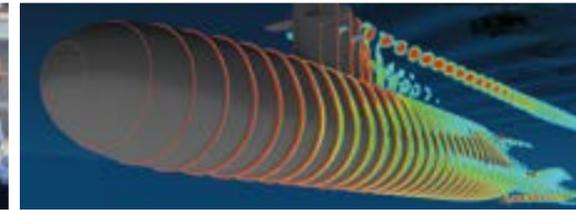
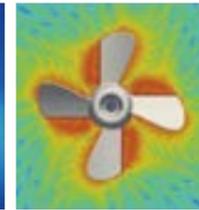
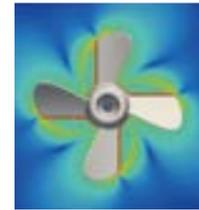
10 ANS AU SERVICE DE L'INNOVATION DU GROUPE

Naval Research, le Centre de Recherche Technologique (CRT) de Naval Group, souffle cette année ses 10 bougies ! 10 années qui ont vu **les équipes du CRT se mobiliser quotidiennement sur des activités complémentaires, l'expertise et la recherche scientifique et technologique**, toutes deux orientées au service des programmes navals.

La recherche scientifique et technologique est un enjeu majeur pour Naval Group. Elle nous permet de rester au niveau de l'état de l'art, et de le dépasser dans des domaines souverains ou spécifiques au naval de défense. **En préparant l'intégration maîtrisée des innovations de demain, elle permet à Naval Group de relever d'innombrables défis** : de construire des navires capables de durer à la mer et de faire preuve en tout temps d'une supériorité de l'engagement face aux menaces, comme d'une forte supériorité sur l'information ; de concevoir et construire des navires plus compétitifs également !

Pour relever ces défis, **il est en permanence nécessaire d'identifier et d'acquérir les capacités scientifiques clés qui permettent de préparer les réponses technologiques appropriées**. Ce travail consiste en particulier à transposer au domaine du naval de défense des développements scientifiques et technologiques portés aujourd'hui par des investissements colossaux du monde civil. Nos enjeux de recherche appliquée sont ainsi multiples et concernent les neuf domaines de S&T (Science & Technologie) portés par le CRT :

- **Méthodes numériques avancées** : mieux appréhender la complexité du réel par de nouvelles approches numériques, pour mieux le représenter et mieux le prévoir.
- **Hommes & Systèmes** : modéliser l'opérateur, connaître l'état de forme du collectif comme de l'individu pour y adapter dynamiquement nos systèmes ; maîtriser la conception centrée utilisateur.



- **Systèmes numériques** : imaginer des architectures et infrastructures numériques évolutives et adaptables à faible coût ; préparer les outils pour accompagner la montée en complexité inhérente à la digitalisation.
- **Traitement des données** : maîtriser les technologies clés pour la réalisation d'intelligences artificielles différenciantes – autonomie décisionnelle et comportementale, planification de haut niveau, collaboration et codécision équipage-humain.
- **Énergie** : augmenter l'efficacité, l'autonomie et la densité énergétique ; répondre aux besoins des armes à énergie dirigée.

- **Écoconception & Environnement** : améliorer la connaissance du coût carbone et environnemental de nos navires ; rendre nos navires résilients aux bouleversements climatiques annoncés.
- **Matériaux & Structures** : augmenter notre productivité en fabrication et maintenance ; réduire la fréquence et la gravité des avaries (fatigue, corrosion, fouling, etc.) ; connaître l'état du navire en temps réel ; développer des matériaux fonctionnalisés pour offrir de nouvelles valeurs ajoutées.
- **Interactions onde-matière** : améliorer les outils prédictifs des signatures et de l'évaluation de la menace ; imaginer de nouveaux matériaux pour la furtivité et l'intégration des antennes.
- **Mécanique des fluides** : prédire et maîtriser la turbulence et les écoulements à physique complexe ; améliorer la prédiction des chargements hydrodynamiques pour dimensionner les structures ; améliorer la prédiction des signatures d'origine hydrodynamique.

En 2010, Naval Group (alors DCNS) crée l'entité Research pour structurer les activités dédiées à la recherche et à l'expertise et en déployer de nouvelles. Alain Bovis, le premier directeur de Research et aujourd'hui vice-président de l'Académie de Marine, revient sur le contexte de l'époque et les constats initiaux : « À la fin des années 2000, des programmes majeurs, dont Barracuda (sous-marins nucléaires d'attaque), ont démarré, appelant un renouvellement de nos bases technologiques. Il fallait reconstituer notre R&T, avec deux objectifs : se doter des outils de conception les plus performants, et investir pour constituer un catalogue de technologies éprouvées. Sans cela, pas d'innovation possible ! Nous avons profité de ce virage pour rassembler nos ressources internes, qui étaient dispersées, sur trois centres : deux à Nantes, le CESMAN et Sirehna, et le CEMIS à Toulon. Naval Research était né, offrant un ensemble cohérent et complémentaire, doté d'un budget dédié et s'ouvrant à de nouvelles collaborations. »

Dix ans plus tard, avec son CRT, **Naval Group dispose de nombreux points forts pour relever ces enjeux** : un programme scientifique solide ; des compétences scientifiques et techniques ainsi que des laboratoires de haut niveau ; une filière de reconnaissance de l'expertise scientifique ; une forte attractivité ; un Conseil scientifique pluridisciplinaire de haut niveau ; et des coopérations académiques et industrielles de premier plan, menées dans une logique de co-innovation, ouverte et collaborative, par la recherche.

Cette nouvelle édition de notre revue RESEARCH illustre cette dynamique en vous proposant un aperçu de nos réalisations récentes et de nos projets émergents. Je vous en souhaite une excellente lecture, à la rencontre de nos activités scientifiques et technologiques, ainsi que des femmes et hommes qui les concrétisent au quotidien.

Vincent Geiger,
Directeur scientifique de Naval Group,
Directeur de Naval Research

01

UNE RECHERCHE COLLABORATIVE

LABORATOIRES COMMUNS : COOPÉRER AVEC LA RECHERCHE ACADÉMIQUE POUR PRÉPARER L'AVENIR

Longtemps, les projets de recherche ont été conduits en interne chez Naval Group. Mais la concurrence internationale et les nouvelles exigences d'excellence et d'innovation ont changé la donne. Pour innover, le groupe industriel s'est engagé dans une logique d'écosystème de compétences et de moyens technologiques avec la recherche académique, dont les laboratoires communs représentent la forme la plus aboutie. Mieux : une équipe dédiée à ces partenariats a été constituée, pilotée par Florence de Launet, responsable de la coopération Recherche et Innovation de Naval Group avec les acteurs académiques français et internationaux.

« Parce qu'il a su unifier des partenariats avec la recherche publique, Naval Research constitue une force pour l'innovation de Naval Group. » Tel est le point de vue de Frédéric Meslin, responsable du développement à l'École Centrale de Nantes, confirmé par Florence de Launet : « Nous pouvons ainsi travailler sur des projets à faible maturité technologique, en vue d'acquies des connaissances scientifiques et des expertises stratégiques dans un objectif industriel déterminé et de progresser dans une logique d'Open Innovation. » La recherche collaborative avec des acteurs publics de premier plan est en effet un outil stratégique majeur pour stimuler et accélérer l'innovation du groupe, lui assurer un rayonnement scientifique international et bénéficier d'effets leviers pour obtenir des financements complémentaires aux investissements de Naval Group. Afin d'encourager ces coopérations, Naval Group a ainsi nommé en 2018 un chef d'orchestre en la personne de Florence de Launet. « Les partenariats n'étaient pas nouveaux, mais il convenait de les structurer, confie-t-elle. Notre objectif était de renforcer nos connaissances sur les écosystèmes de recherche, les guichets de financements et les modalités de rapprochement avec les équipes académiques : thèses, chaires, accords-cadres ou laboratoires communs. »

DES PARTENARIATS DÉDIÉS AUX ENJEUX DE NAVAL GROUP

Naval Group a de cette manière opéré un véritable changement culturel, afin que la coopération avec l'écosystème académique devienne une opportunité pour tout travail de recherche en science et technologie. Il s'est notamment engagé dans des laboratoires communs pour bâtir des programmes de recherche qui répondent spécifiquement à ses besoins. « Parce qu'il est bilatéral et doté d'une gouvernance partagée, le laboratoire commun constitue une structure flexible de collaboration, décrit Florence de Launet. C'est une forme très aboutie de coopération, fondée sur la compréhension mutuelle des enjeux de chacun et sur la mise en commun de moyens humains, financiers et matériels. On est dans la coconstruction d'une recherche, pas dans la réalisation d'une simple prestation. » La particularité du laboratoire commun est d'être conclu à l'échelle

d'une entité académique et d'une entreprise industrielle. Cette coopération d'ensemble présente de nombreux avantages, comme la possibilité d'utiliser les plateformes technologiques de l'école, par exemple le bassin de houle et de carène de l'École Centrale de Nantes en vue de tester des éléments de grande taille. « Le laboratoire commun, généralement créé sur le terrain d'une collaboration déjà solide, permet de s'inscrire dans un partenariat large, indique Elisabeth Crépon, membre du Conseil scientifique de Naval Group et directrice de l'ENSTA Paris. Il donne accès à des compétences de l'école au-delà de celles qui étaient impliquées dans la coopération initiale et d'embrasser une large variété de TRL au sein des projets. » C'est la porte ouverte à des programmes interdisciplinaires, susceptibles d'apporter une réponse scientifique complète aux enjeux industriels.



ACCÉDER AU MARCHÉ EXPORT ET SÉCURISER LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE

« Plus globalement, le laboratoire commun offre la possibilité, pour Naval Group, de collaborer avec les partenaires de ses partenaires académiques, notamment à l'international, signale Armel de la Bourdonnaye, également membre du Conseil scientifique de Naval Group et directeur de l'INSA Haut-de-France. Cela permet à l'industriel de faire de la "diplomatie scientifique" et d'aborder plus facilement le marché à l'export. » Autre atout non négligeable du laboratoire commun : le contrat signé par les deux parties permet de penser en amont les questions de propriété intellectuelle et industrielle. C'est très sécurisant car tout est fiabilisé en amont de l'accord bilatéral. « En outre, le laboratoire commun valorise les expertises de Naval Group auprès des élèves ingénieurs, en master, en thèse et en post-doc. De quoi susciter des vocations ! » Enfin, pour les écoles, le laboratoire commun fournit l'opportunité de mieux saisir tout l'éventail des besoins de l'entreprise. Les premiers laboratoires communs ont été noués avec l'ENSTA Bretagne et l'École Centrale de Nantes, concrétisant d'anciennes collaborations. « Le laboratoire Gustave Zédé (voir l'encadré) est né en 2015, à la suite de 10 ans de recherche commune, rappelle Yann Doutréleau, directeur scientifique de l'ENSTA Bretagne. La confiance mutuelle et l'envie de travailler ensemble étaient déjà très fortes. » Les chercheurs académiques et industriels sont plus que des partenaires. « Ce sont des "collègues", qui ont la volonté de coconstruire dans la durée, souligne Frédéric Meslin. Très impliqués, ils ont le réflexe de répondre ensemble aux appels d'offres de programmes européens. » Et de les remporter, comme ce fut le cas avec le programme RAMSSES, à l'origine d'une première mondiale à laquelle l'ENSTA Bretagne a aussi contribué en réalisant des tests (voir l'encadré sur le laboratoire JLMT).

UNE DÉMARCHE DE LABORATOIRES COMMUNS QUI VA SE POURSUIVRE

Ces deux structures ont depuis renouvelé leurs contrats, pour une durée de cinq ans. « Nous réfléchissons à étendre pour nos laboratoires le périmètre de recherche en lien avec nos engagements sur les programmes internationaux de Naval Group », poursuit Florence de Launet. Et ce n'est pas tout, puisque de nouveaux laboratoires communs devraient se déployer encore, afin d'imaginer de nouvelles technologies pour les navires de demain. « De nombreux échanges sont en cours avec de futurs partenaires académiques de premier rang comme Sorbonne Université, le CNRS, Ifremer ou des écoles de la Défense, telles que Saint-Cyr Coëtquidan ou l'ENSTA Paris, sur des domaines aussi divers que la physique quantique, l'écoconception, les drones, la discrétion électromagnétique, l'acoustique sous-marine, voire les sciences sociales et humaines. Nous n'avons pas fini de collaborer en recherche ! »



”

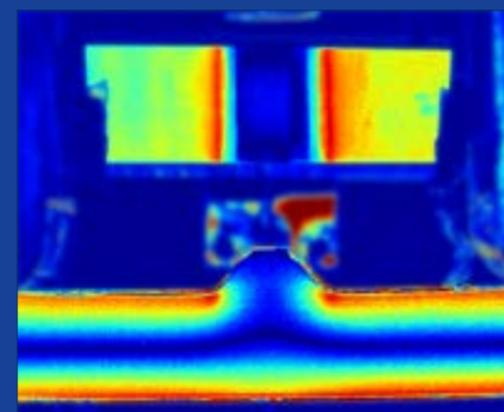
« Il s'agit pour nous d'un investissement sur le moyen et long terme, pour avoir la possibilité d'orienter le programme scientifique, d'avoir accès à une recherche académique de haut niveau et de contribuer au recrutement des jeunes talents acteurs de notre innovation »

Florence de Launet, responsable de la coopération Recherche et Innovation de Naval Group

CHAIRE SELF-HEATING : PRENDRE LA TEMPÉRATURE DES JOINTS SOUDÉS ET PRÉDIRE LEUR DURÉE DE VIE

En 2017, ce qui était alors une idée s'est matérialisée par une thèse co-encadrée par Naval Group et l'ENSTA Bretagne, au laboratoire commun Gustave Zédé. « Les travaux de thèse de Loïc Carteron ont permis de mettre au point une méthode d'auto-échauffement pour caractériser en très peu de temps l'amorçage et la propagation de fissures au niveau de joints soudés, décrit Florent Bridier, ingénieur de recherche au Centre d'expertise des structures et matériaux navals (CESMAN) et responsable du laboratoire Gustave Zédé pour Naval Group. Auparavant, une campagne d'essais aurait plusieurs semaines et nécessitait des dizaines d'échantillons ; avec cette méthode, une journée de tests et deux éprouvettes suffisent ! »

La méthode de caractérisation par auto-échauffement représente une telle opportunité pour la prédiction de la durée de vie des structures navales qu'elle a motivé, en 2021, la création de la chaire Self-Heating avec le soutien financier de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Cette chaire, à laquelle participent également l'ENSMA à Poitiers côté académique et Safran côté industriel, permet de créer une forte dynamique de recherche collaborative autour de l'auto-échauffement et de consolider des méthodologies d'essais issues de travaux académiques pour de futures applications industrielles. « Jusqu'en 2025, nous allons travailler à la mise en œuvre de l'auto-échauffement sur divers matériaux métalliques ou composites, conclut Florent Bridier. La chaire est désormais en place, avec huit étudiants en thèse et quatre post-doctorants, qui partagent leur activité de recherche entre l'ENSTA Bretagne, l'ENSMA, Safran et Naval Group. »



Exemple de mesure du couplage thermo-élastique sur un joint soudé

Le dispositif expérimental développé dans le cadre de la chaire Self-Heating permet d'accéder aux propriétés de fatigue d'un élément structural, en couplant à un essai de fatigue des analyses de son comportement thermique, au moyen d'une caméra thermique. La figure donne un exemple de mesure du couplage thermo-élastique sur un joint soudé pour application navale (vue de dessus et vue de côté).

UNE PALE CREUSE EN FABRICATION ADDITIVE, PREMIÈRE MONDIALE

« Prenons l'exemple de l'hydrodynamique navale, illustre Jean-Jacques Maisonneuve, responsable du domaine scientifique Mécanique des fluides de Naval Group. Nous avons conçu ensemble un modèle numérique du comportement de la houle. » L'intérêt de cette recherche est majeur : mieux prédire les mouvements et anticiper le contrôle des navires pour améliorer leur stabilisation et renforcer la sécurité d'opérations comme l'appontage d'hélicoptères, y compris sur mer forte. Jusqu'à présent, de telles opérations sont possibles sur mer modérée. Demain, elles le seront pour des états de mer plus forts et plus contraignants ! En fabrication additive aussi, les recherches ont porté leurs fruits. « Trois ans ont suffi pour une première mondiale, alors que nous avions imprimé dès 2017 une première pale pleine d'hélice de grande dimension, s'enthousiasme Guillaume

Rückert, expert senior en matériaux métalliques au CESMAN. En 2019, nous avons réalisé une pale creuse en fabrication additive par procédé WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Le fait d'être un laboratoire commun nous permet de ne pas nous arrêter à ce succès et d'améliorer les process sur des pièces de complexité croissante. » Depuis 2019, les partenaires du JLMT ont ainsi optimisé les paramètres de dépôt métallique avec de nouveaux matériaux, dont différents alliages titane. Ils ont aussi travaillé sur des alternatives au procédé WAAM et modélisé les étapes de fabrication pour prédire le comportement de la pièce. « Aujourd'hui, nous maîtrisons la technologie et une hélice de 2,50 mètres d'envergure, composée de cinq pales creuses, a été montée sur le chasseur de mines Andromède, parti en mer au début de l'année 2022. », conclut Guillaume Rückert.

LABORATOIRE COMMUN JLMT : LA CONFIRMATION D'UNE COOPÉRATION HISTORIQUE AVEC L'ÉCOLE CENTRALE DE NANTES

Le Joint Laboratory of Marine Technology (JLMT) a été créé conjointement par l'École Centrale de Nantes et Naval Group en 2016, sous l'impulsion de Guillaume Rückert, expert senior en matériaux métalliques au CESMAN, et de Jean-Jacques Maisonneuve, responsable du domaine scientifique Mécanique des fluides de Naval Group et expert de Sirehna, la filiale spécialisée dans le contrôle du comportement dynamique des plateformes navales. « *Le rapprochement avec l'École Centrale s'est fait naturellement, confie ce dernier, sachant que c'est l'un des rares établissements en France à s'intéresser à l'hydrodynamique navale. Nos liens étaient déjà historiquement forts.* » L'objectif ? Mutualiser les capacités d'innovation, les équipements et les moyens d'essai, et lancer rapidement une recherche opérationnelle sur trois thématiques : l'hydrodynamique navale, la fabrication additive et la simulation numérique multiphysique. Déjà, les résultats sont remarquables, avec des applications concrètes.



+ La pale creuse d'hélice en fabrication additive, une première mondiale

Naval Group et l'École Centrale de Nantes ont imprimé le premier démonstrateur de pale creuse d'hélice en fabrication additive métallique, dans le cadre du projet européen H2020 RAMSSES. Cette innovation vise à la fois des gains industriels et opérationnels, avec l'ambition d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire l'impact environnemental des propulseurs.



SIX LABORATOIRES COMMUNS

Déjà six laboratoires communs ! Les premiers - Gustave Zédé et JLMT - ont donné des résultats décisifs, qui ont eu un rayonnement international. Renouvelés en 2019 et 2020, ils ont bénéficié d'une intensité de recherche importante pour poursuivre les travaux. Entre-temps, quatre autres laboratoires communs ont été mis en place, sous la houlette de l'équipe de Florence de Launet.

- **Laboratoire Gustave Zédé**, créé en décembre 2015 avec l'ENSTA Bretagne, sur l'intégrité en service des matériaux et assemblages pour structures navales.
- **Joint Laboratory in Marine Technology (JLMT)**, créé en avril 2016 avec l'École Centrale de Nantes, sur la fabrication additive de grandes pièces par dépôt de fil, les problèmes à surface libre en hydrodynamique navale et la modélisation des matériaux, structures navales et quantifications d'incertitudes.
- **Laboratoire Commun d'Innovation en Intelligence Artificielle (LC2IA)**, créé en septembre 2017 avec l'ENSTA Paris sur l'intelligence artificielle, l'ingénierie système pour la conception de systèmes critiques autonomes et la maîtrise de l'information et aide à la décision.
- **Laboratoire sur le Traitement de l'Information Sous-Marin (LTISM)**, créé en décembre 2017 avec l'université de Toulon, sur le traitement de l'information sous-marin (trajectographie en particulier).
- **Laboratoire sur les Systèmes Embarqués Navals Intelligents (SENI)**, créé en novembre 2019 avec l'ENSTA Bretagne, sur la conception et le développement des systèmes embarqués navals intelligents - notamment dans le domaine de la robotique marine autonome et l'intelligence artificielle.
- **Laboratoire Ambition INRIA 2023**, créé en décembre 2019 avec l'Inria, sur les domaines de l'intelligence artificielle appliquée au cyber et au traitement du signal.

* Niveaux de maturité technologique (Technology Readiness Levels).
** Voir magazine RESEARCH 3, p.8.

PARTENARIAT NAVAL GROUP CNRS : VOIR PLUS LOIN, VOIR PLUS LARGE

En signant un accord-cadre avec le CNRS, l'un des organismes de recherche les plus renommés au monde, Naval Group inscrit sa stratégie d'innovation collaborative dans le long terme, tout en accédant à de nouvelles expertises scientifiques et à un réseau d'excellence internationale. Les deux partenaires, qui comptent déjà trois laboratoires communs, collaboraient également via des projets ponctuels ; ils passent la vitesse supérieure.

L'accord-cadre conclu début 2021 entre Naval Group et le CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) organise les futures collaborations en termes juridiques, de moyens, de propriété intellectuelle sur les brevets, etc. Plus besoin de renégocier à chaque nouveau projet commun : tout est plus simple.

DÉJÀ 60 CONTRATS DE R&D ET TROIS LABORATOIRES COMMUNS

Ce partenariat consolide une convergence de vues et une confiance mutuelle nées et enrichies ces dernières années au fil d'une soixantaine de contrats de R&D, et à travers la création de trois laboratoires communs entre 2015 et 2019 (voir l'article sur les laboratoires communs). « Naval Group a une manière de penser ses sujets à 30 ans qui s'accorde parfaitement avec le temps long de la recherche scientifique », estime Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation du CNRS. Vincent Geiger, directeur scientifique de Naval Group, insiste pour sa part sur l'envergure et le large périmètre d'activité du CNRS : « Il nous donne une visibilité internationale sur les laboratoires d'excellence, les innovations scientifiques qui préfigurent les ruptures à venir. De plus, il nous ouvre les portes de programmes collaboratifs internationaux comme @reate à Singapour. »

RESTER LEADER SUR CERTAINS SUJETS...

Pour définir des priorités au sein du très large périmètre scientifique d'intérêt du naval de défense, les deux partenaires ont consacré deux journées à partager leurs feuilles de route respectives, en sciences et en technologies. « Un travail de fond qui a mobilisé nos meilleurs experts et a fait émerger de vrais sujets. », souligne Jean-Luc Moullet. Pour poursuivre cette mise en commun, un comité Recherche et Innovation a vu le jour. Naval Group compte doser son niveau d'engagement en fonction des sujets. « Sur des thèmes comme la détection sous-marine, le facteur humain ou la corrosion et la fatigue des matériaux, nous sommes à l'état de l'art international et nous voulons y rester », détaille Vincent Geiger. C'est ce qui a justifié par exemple la création avec le CNRS du laboratoire Gustave Zédé, qui s'intéresse depuis 2015 à l'intégrité en service des matériaux et structures navales. »

... ET MENER UNE VEILLE ACTIVE SUR LES AUTRES

Sur d'autres thèmes, Naval Group mettra la barre moins haut, mais maintiendra une veille très active. « En intelligence artificielle notamment, le meilleur de la R&D mondiale est mené par d'autres acteurs. Le CNRS peut nous aider à nous approprier les sujets phares et à les transposer pour des applications au naval de défense, tout comme l'Inria avec qui nous avons également noué un partenariat stratégique. » Les transferts vers l'industrie constituent une mission à part entière du CNRS depuis un décret de 1982. « Nous ne faisons pas de recherche

appliquée, précise Jean-Luc Moullet. Nous proposons des réponses scientifiques à des problèmes industriels, pour aider nos partenaires à innover et à se renforcer sur leur marché. Naval Group, qui nous apporte des problématiques riches et variées, pourra mobiliser la quasi-totalité de nos disciplines. » En particulier, les chercheurs en mathématiques, physique, sciences du numérique, énergie, sciences humaines et sociales devraient être en première ligne. Un effort nécessaire, au service de la Défense nationale.



”

« Naval Group a une manière de penser ses sujets à 30 ans qui s'accorde avec le temps long de la recherche »

Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation du CNRS



02

DES SUJETS ÉMERGENTS ET STRUCTURANTS



+ 70 points de connexion informatique sur un sous-marin de deuxième génération, 800 sur la troisième génération prévue pour 2030 : le numérique, omniprésent mais vite frappé d'obsolescence, bouleverse la façon de concevoir les navires.

LA RÉVOLUTION NUMÉRIQUE AU SERVICE DE LA CONCEPTION DE SOUS-MARINS

Considérés comme les systèmes industriels les plus complexes au monde, les sous-marins intègrent de plus en plus de fonctions digitales. Décisives pour les performances du navire, elles sont très interdépendantes et soumises à une obsolescence rapide. Comment adapter les méthodes de conception à cette nouvelle donne ? Une question majeure pour les acteurs du naval de défense.

Pourquoi est-il si compliqué de concevoir un sous-marin ? Parce qu'il s'en fabrique peu et que chaque génération se différencie fortement de la précédente. Parce qu'il est propulsé par une mini-centrale nucléaire, doté d'un système d'armement sophistiqué, et sert de lieu de vie à une centaine de personnes pendant plusieurs mois. Et parce qu'il compte un million de composants (contre 10 000 sur un avion de ligne), dont chacun concourt à sa pesée, à sa propulsion et à sa discrétion acoustique. Entre autres...

DES CONNEXIONS INFORMATIQUES MULTIPLIÉES PAR DIX

« Pour gérer tous ces aspects à la fois, le processus de conception de référence s'appuyait jusqu'ici sur les méthodes traditionnelles de l'ingénierie système, souligne Pierre Dallot, conseiller scientifique du directeur scientifique de Naval Group. Elles impliquent la définition détaillée, avant fabrication, des composants qui participeront à chaque fonction. Mais cette approche n'est pas adaptée aux systèmes numériques, qui comportent de nombreuses inconnues, sont sujets à des obsolescences rapides et sont fortement interdépendants. » Le problème est d'autant plus crucial que ces systèmes numériques pilotent des fonctions vitales : la chaufferie

nucléaire, la stabilité du sous-marin, ses plongées, sa navigation, son management de combat... Ils tendent à devenir ubiquitaires : « On comptait 70 points de connexion informatique sur nos engins de deuxième génération, il y en aura 800 sur la suivante. » De plus, ils peuvent apporter des gains fulgurants. « Dans les années 1990, la Marine américaine a doublé la sensibilité de ses sonars en quelques années par optimisation logicielle, rappelle Christophe Baixas, responsable du domaine scientifique Systèmes numériques de Naval Group. Le rôle du logiciel va devenir prépondérant dans la performance de nos navires. »

PROTOCOLE IP ET CLOUD, UN DÉBUT D'ORGANISATION

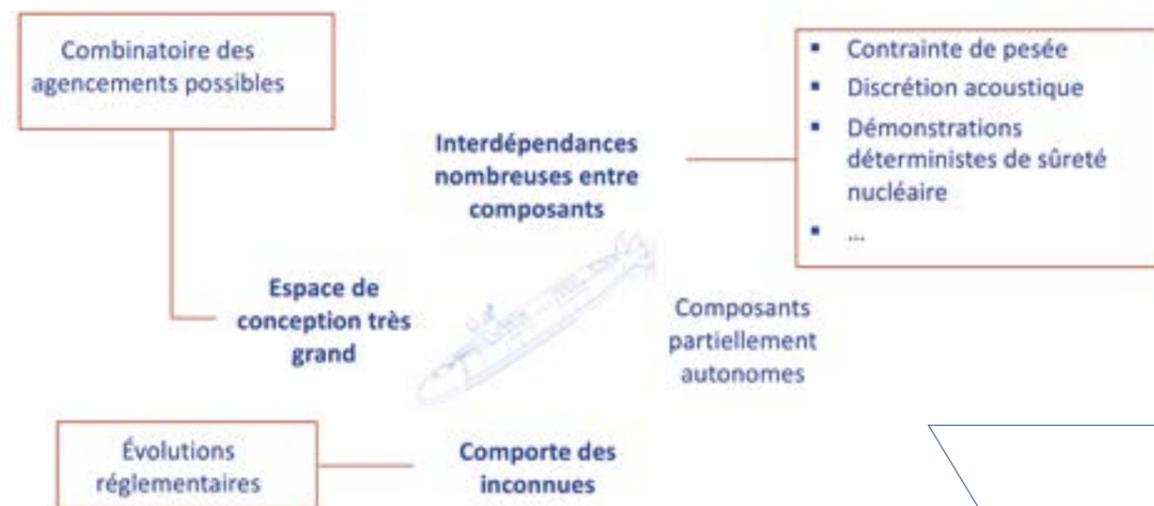
Mais comment intégrer dans la conception d'un sous-marin, qui s'étale sur dix ans, des technologies obsolètes en deux ou trois ans ? Dans une décennie, quel sera l'état de l'art en architecture réseau, en gestion des données, en intelligence artificielle ou en cybersécurité ? « L'ingénierie système traditionnelle reste pertinente pour les éléments à cycle de vie long, dont l'exemple extrême est la coque, estime Pierre Dallot. En revanche, il faut apprendre à raisonner autrement pour les systèmes numériques : imaginer des solutions faciles à adapter, gérer de l'incertitude plutôt que des spécifications, prévoir au lieu de prédire. » Bref, une révolution culturelle.

Par chance, le monde du digital a commencé à mettre de l'ordre dans son développement foisonnant. Infrastructures et réseaux ont été standardisés autour du protocole IP. Quant à l'approche Cloud, elle apporte une flexibilité dans l'allocation des ressources (données, moyens de calcul, réseau) aux besoins ; les évolutions ultérieures s'en trouvent facilitées. « Nous allons capitaliser sur ces piliers, confirme Christophe Baixas, car ils nous donnent de l'adaptabilité à trois niveaux : évolutions gérables par modifications software, gestion proactive des obsolescences, amélioration continue de la puissance de calcul et des services. »

PRÉVOIR DES CAPACITÉS, POUR ÊTRE CAPABLE D'ÉVOLUER

Le concept clé de cette approche consiste à prévoir ce qu'il est convenu d'appeler des « capacités ». Autrement dit, à penser le sous-marin selon des caractéristiques techniques qui facilitent l'intégration continue d'innovations et de technologies émergentes... sans perturber les autres systèmes. C'est à ce prix que l'on peut tirer parti, en peu de temps, de technologies émergentes comme l'intelligence artificielle, ou faire face rapidement à des menaces inédites. « Le client définira de grands objectifs forcément évolutifs. Nous imaginerons les architectures informatiques qui auront la capacité d'y être rapidement adaptées. »

Il n'existe pas de méthode de conception unique pour orchestrer une telle flexibilité. « L'inspiration est à rechercher du côté de l'industrie civile, contrainte à la fois par la concurrence et par la versatilité de ses clients », indique Pierre Dallot. Christophe Baixas, lui, a étudié l'approche américaine dite de « complexité entreprise », dont le DoD (département de la Défense) a fait l'axe clé de sa modernisation informatique. « Elle comporte un volet technique, avec des outils de gestion de la complexité flexibles et adaptatifs tels que le Cloud, et un volet humain d'égale importance. La "loi de Conway" pointe l'isomorphisme entre l'architecture et l'organisation qui la conçoit. Aussi, les équipes de conception doivent être reconfigurables pour s'adapter à un besoin qui change en permanence. »



L'ENJEU D'ADHÉSION DES CLIENTS AU PRINCIPE DE L'ÉVOLUTIVITÉ

La complexité entreprise impacte en profondeur les architectures développées, la façon de travailler, les modèles d'affaires, la relation avec le client... Exit les organisations très hiérarchisées : l'autonomie de décision des équipes et leur capacité d'apprentissage sont essentielles pour adapter rapidement un système complexe aux circonstances et aux enjeux. La conception d'un produit et son exploitation forment un continuum, puisque les évolutions se poursuivent tout au long du cycle de vie.

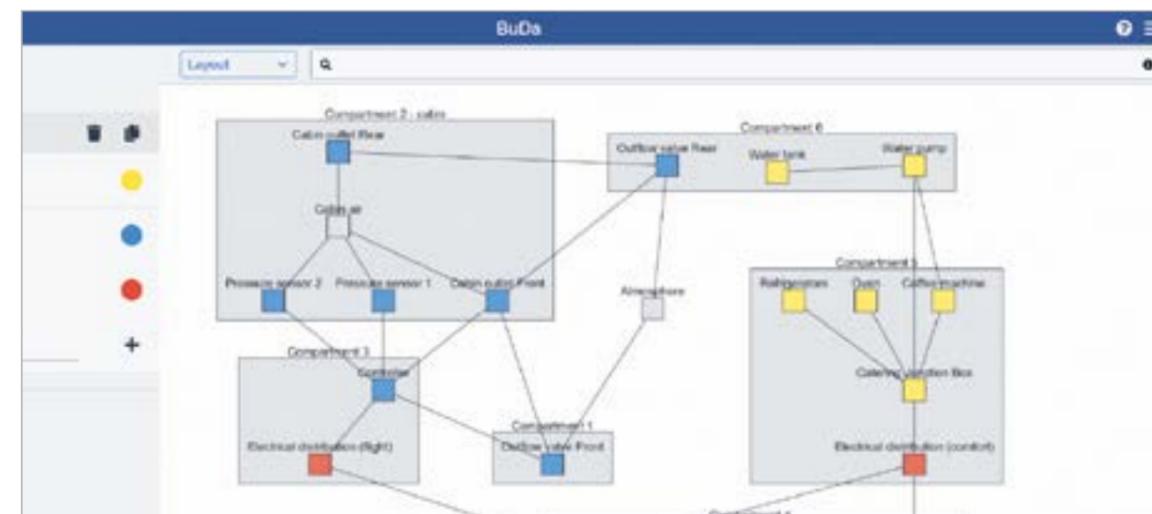
Les clients doivent aussi adhérer à ce nouveau modèle : un navire spécifié dans ses moindres détails ne saurait être évolutif. « Nous travaillons avec d'autres acteurs de la Défense sur un document de conviction qui explique cette approche à nos donneurs d'ordre. », révèle Pierre Dallot.

Fin 2021, Naval Group a répondu avec d'autres industriels à un appel d'offres du Fonds européen de la Défense. Il porte sur un navire numérique de surface, polyvalent et interopérable entre pays de l'UE, où l'architecture informatique tient une place capitale. « Nous avons été retenus, nous pouvons tester ce nouveau mode de conception en grande nature. », souligne Christophe Baixas.

ENRICHIR LES ANALYSES DE SÛRETÉ EN MISANT SUR LA SIMPLICITÉ

Si cette révolution demande du temps, des avancées plus ciblées font déjà évoluer les pratiques. Ainsi, Alan Guegan, chargé du développement d'outils d'aide à la conception chez Sirehna (filiale de Naval Group), a imaginé une nouvelle façon de visualiser les données pour les analyses de sûreté : « Quand un expert se penche sur les réseaux fluides, électriques et informatiques d'un navire, il passe en revue des milliers de composants reliés par des centaines de kilomètres de câbles et de tuyauteries. Les graphes de représentation sont chargés et non hiérarchisés. Comme sur une carte de France où toutes les voiries, du chemin vicinal à l'autoroute, auraient la même largeur et la même couleur. » À l'inverse, le prototype d'Alan Guegan, baptisé

BuDa, mise sur la simplicité : un seul trait pour représenter deux objets en interaction, qu'il y ait une ou trente connexions physiques entre eux. Il révèle ainsi des erreurs de « haut niveau » : un système sécurisé relié à un autre qui ne l'est pas, une boucle de commutation qui ne respecte pas une règle de conception, un objet indispensable à une fonction mais non connecté... « Cet outil ne remplace pas les analyses de sûreté, mais les enrichit en offrant du recul, de la hauteur de vue et une multitude d'angles d'observation. » En 2020, BuDa a d'ailleurs été l'un des deux projets incubés du premier programme intrapreneurial de Naval Group. Une distinction qui illustre la place croissante des enjeux de complexité dans le naval de défense.



« Un système compliqué comprend de nombreux composants. Dans un sous-marin, ces composants sont interdépendants, ce qui signe sa complexité »
Pierre Dallot

Sur cette représentation des systèmes de bord d'un avion de ligne, BuDa met en évidence la cohabitation indésirable (compartiment n°6) du réservoir d'eau de la machine à café et d'un équipement de sûreté, la soupape de régulation de la pression en cabine. Cette configuration a donné lieu un jour à un cas réel de dépressurisation en vol : le réservoir d'eau s'est mis à fuir et a empêché le bon fonctionnement de la soupape.

L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE POUR LA MARINE DE DÉFENSE

Anticiper, prédire, prévenir, sécuriser, optimiser, accélérer, gérer, détecter, repérer, surveiller, protéger, croiser les informations, trier des images, automatiser les tâches, assister la navigation : l'intelligence artificielle est une aide précieuse pour la Défense nationale, qui a donc décidé de consacrer chaque année 100 millions d'euros à la recherche dans ce domaine. Pour ne pas rater ce virage technologique, Naval Group s'est engagé depuis quelques années déjà dans différents projets.

En avril 2019, la ministre des Armées Florence Parly affirmait lors de son discours à l'Institut de Convergence DATA IA à Saclay, qu'elle « *compte bien faire de l'intelligence artificielle une priorité de notre Défense nationale. [... Cette technologie] nous permettra de mieux comprendre et mieux prévoir les menaces, d'agir plus vite et avec plus de précision et de certitude.* »

UNE IMPLICATION D'AMPLEUR DANS L'IA

En 2019, l'Intelligence artificielle (IA) comptait déjà parmi les sujets d'intérêt explorés par Naval Group. L'entreprise est même engagée dans plusieurs programmes d'envergure, comme Confiance.ai, défi lancé en 2021, destiné à « *sécuriser, certifier et fiabiliser les systèmes fondés sur l'Intelligence artificielle.* »

Concrètement, les projets sont structurés en fonction du degré de maturité des travaux, selon qu'ils soient en phase de R&D ou prêts à passer au développement industriel, comme le décrit Jean-Michel Tran, directeur technique Intelligence Artificielle : « *Cette recherche est très exigeante, non seulement parce que nous travaillons sur des systèmes critiques, des systèmes interconnectés (données hétérogènes), ou frugaux en données, des systèmes temps réels réagissant à des menaces létales immédiates et que les bâtiments doivent rester indétectables, mais aussi parce que le milieu marin est un environnement complexe et peu communicant. Nous n'avons pas le droit à l'erreur !* »

”

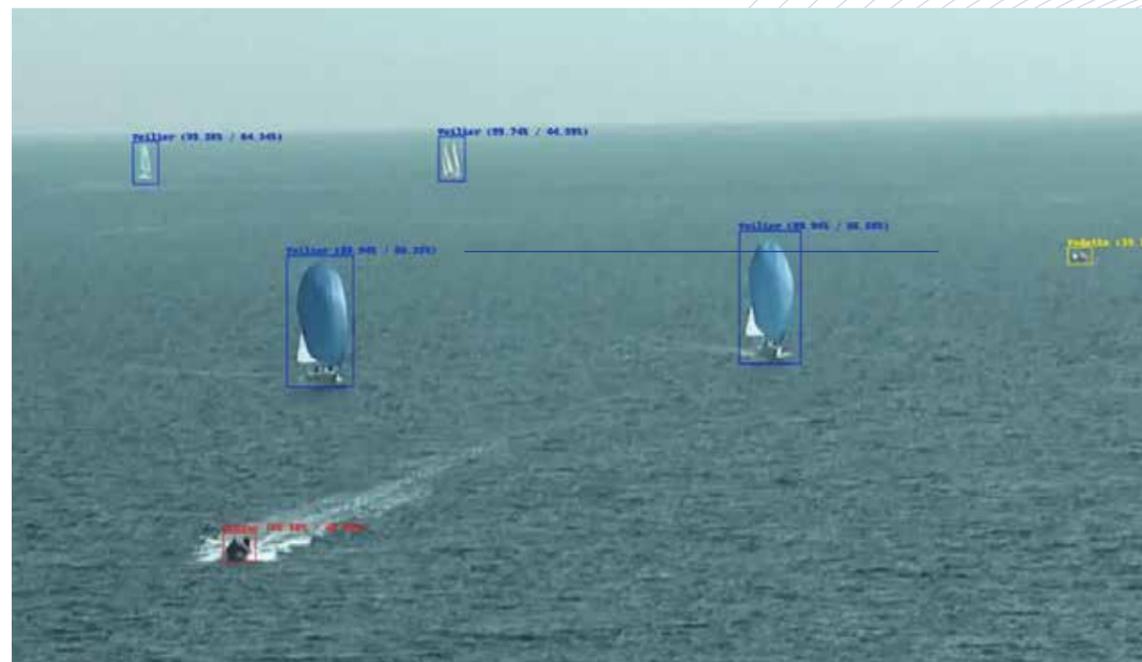
« Notre mission consiste à proposer des outils fondés sur l'IA pour valoriser ces informations, dispersées un peu partout, au sein de diverses entités de Naval Group : celle des sous-marins, des frégates, des services... »

Vincent Martin

DÉTECTER ET CLASSIFIER POUR ASSISTER LES OPÉRATEURS ET LA NAVIGATION

Les travaux en IA menés par Naval Group visent avant tout à mettre au point des solutions pour ses clients. « *Les applications développées par notre équipe concernent principalement l'assistance aux opérateurs et à la navigation, rapporte Quentin Oliveau, responsable Data Science au CEMIS*. Notre but est de détecter des bateaux en mer et de les classifier, en exploitant le machine learning.* » Dite « supervisée », cette technique d'apprentissage repose sur l'étiquetage préalable des données. « *Imaginez un navire équipé d'une caméra, prenant des images sur la mer. L'étape d'étiquetage consiste à tracer un rectangle autour de chaque bateau présent sur les images. On apprend ensuite à un algorithme à prédire la position des rectangles encadrant les bateaux sur de nouvelles images, en le conduisant à imiter ce qu'il aura vu sur ces données "étiquetées".* »

Même principe pour la classification de ces images, avec l'objectif de reconnaître l'embarcation, pas seulement la repérer : est-ce un zodiac, un voilier, un jet-ski ou une chaloupe ? L'algorithme est en mesure de prédire le type de bateau, à condition d'avoir annoté chaque image enregistrée comme étant un zodiac ou autre. La difficulté tient dans le temps long d'acquisition préalable de ces données, mais le saut qualitatif en termes de performance apportée par une annotation de qualité est tel avec les méthodes par apprentissage que le jeu en vaut clairement la chandelle. Et au-delà de la reconnaissance d'images, les algorithmes développés chez Naval Group servent aussi à identifier les bruits sous-marins. D'autres visent à optimiser la consommation d'énergie des bâtiments ou à planifier leurs trajectoires.



+ Les techniques d'IA peuvent être utilisées afin de détecter la présence de navires sur une zone donnée et de réaliser une classification des embarcations détectées.

METTRE À PROFIT LES DONNÉES INTERNES AVEC LES ALGORITHMES

L'IA est également utilisée pour améliorer certains process internes chez Naval Group, comme ceux liés aux achats, aux réponses aux appels d'offres, à la maintenance. « *Nos bases de données fourmillent de retours d'expérience, affirme Vincent Martin, data scientist au CEMIS. Notre mission consiste à proposer des outils fondés sur l'IA pour valoriser ces informations, dispersées un peu partout, au sein de diverses entités de Naval Group : celle des sous-marins, des frégates, des services...* » Des informations provenant de données de fonctionnement, de plans, de comptes rendus d'intervention, de contrats, etc., et stockées dans diverses bases de données. Mais comment retrouver des informations aussi hétérogènes, les exploiter et les rendre utiles ?

À cette question, une réponse en plusieurs étapes. La première consiste à identifier sur quel serveur ou dans quelle base de données se trouvent les informations. Il convient ensuite de les récupérer puis de les centraliser au COSIN**, un data center de 500 m² situé à Toulon qui, depuis 2017, concentre de nombreuses données de Naval Group. « *En nous appuyant sur des algorithmes, nous traitons ces informations hétérogènes et proposons des fonctionnalités de recherche et d'analyse aux utilisateurs* », explique Vincent Martin. Comment faire ? Prenons T-REX, le moteur de recherche et d'analyse des fiches d'anomalies qualité, utilisé par 300 collaborateurs de Naval Group.

L'étiquetage manuel des données était mission impossible, du fait des centaines de milliers de remontées (de niveau disparate) aujourd'hui dans le moteur de recherche (et 300 nouvelles fiches d'anomalies au quotidien), d'où l'intérêt de l'IA. « *Un algorithme va extraire le texte des documents*** et chercher à en comprendre le sens, au-delà du vocabulaire employé, pour annoter les informations, par exemple selon qu'elles soient publiques, confidentielles ou classifiées. Un autre algorithme va catégoriser les anomalies par reconnaissance textuelle, en fonction du type de problème (soudure, maintenance, contrat...), un peu comme Google News est capable de mettre un article évoquant un match de tennis dans la catégorie Sport.* »

Durant la phase d'apprentissage, on fournit au système des exemples de fiches bien classées pour qu'il apprenne à catégoriser de nouvelles fiches. Durant la phase d'inférence, l'algorithme est alors capable de classer de nouvelles fiches, même si celles-ci sont écrites différemment de celles rencontrées en phase d'apprentissage. Cela est possible parce que les modèles utilisés « encodent » le sens des informations plutôt que les mots directement. Ainsi, deux mots ou phrases écrites avec un vocabulaire différent mais sémantiquement proches seront voisins dans l'espace de représentation créé.

* Le CEMIS (Centre d'Expertise de Maîtrise de l'Information et des Signatures) est une unité de Recherche et Développement de Naval Research.

** Centre Opérationnel de Soutien Intégré Numérique.

*** C'est ce qu'on appelle « océrisation », la transformation d'une image à l'intérieur d'un fichier informatique en un fichier texte distinct.

LES CHALLENGES DE L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE DANS LA DÉFENSE

Le fait que ces recherches soient conduites pour la marine de Défense apporte des challenges supplémentaires par rapport aux applications civiles. On pense aux exigences de cybersécurité et d'autorisations d'accès aux données. Ce ne sont pas les seules. L'impossibilité d'utiliser des informations externes comme celles liées à la météorologie, ainsi que le langage et les sigles très spécifiques de la Marine nationale, posent aussi de nombreuses difficultés. Il convient donc d'adapter les algorithmes aux particularités d'un vocabulaire qui n'existe nulle part ailleurs. Les outils doivent en plus fonctionner avec un équipage humain dense, notamment dans les sous-marins, pour distinguer une voix parmi d'autres et les sons ambiants. Et ce n'est pas tout.

« Si on dispose de beaucoup de données, on en a moins que dans le civil : dans le domaine militaire, il n'y a pas d'effet de série et moins d'historique de fonctionnement. », rappelle Vincent Martin.

La prochaine étape pour l'IA chez Naval Group sera de l'appliquer aux systèmes de management de combat. La France destine l'IA au mode défensif. Les algorithmes serviront à choisir les forces à mettre en œuvre et l'arme efficace pour riposter à une attaque, après avoir clairement identifié la menace. « Une nouvelle fois, ce sera une aide à la décision, conclut Jean-Michel Tran, car la France refuse de confier une décision létale à une machine qui agirait de façon autonome et échapperait à tout contrôle humain. »

UN RÉSEAU DE NEURONES POUR NE PAS PERDRE LA MÉMOIRE

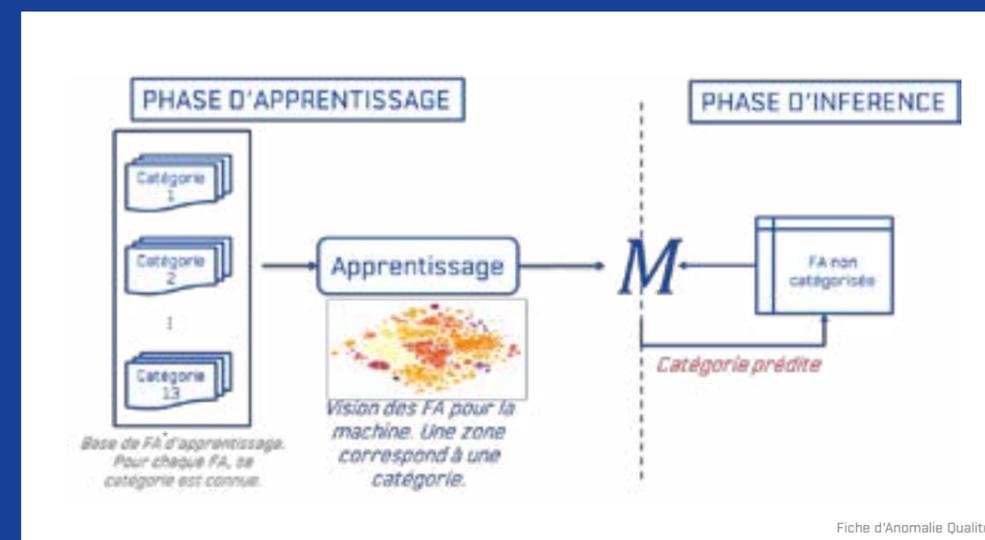
À terre, pas de problème de mémoire informatique, mais sur un navire, « La capacité de stockage est limitée, explique Quentin Ferdinand, doctorant à l'ENSTA Bretagne, en thèse CIFRE à Naval Group. Or, pour que l'IA soit en mesure de reconnaître une embarcation, il faut qu'elle soit capable de "généraliser". Un zodiac ne ressemble pas nécessairement à un autre zodiac, mais il partage des caractéristiques communes. Il convient donc de disposer d'un très grand nombre d'images différentes annotées "zodiac". Plus on en aura, meilleure sera la capacité d'apprentissage de l'algorithme. »

Dans cette perspective, Quentin Ferdinand travaille sur des algorithmes qui apprennent en continu (Deep Continual Learning), pour améliorer sans arrêt leurs performances. « Cette discipline très récente nécessite de stocker les données acquises au fil du temps. C'est là que le bât blesse : sur un bateau, par manque de capacité de stockage, certaines images anciennes doivent être supprimées pour faire de la place aux nouvelles données acquises. Les algorithmes risquent alors de les oublier. » Pour résoudre ce problème, Quentin Ferdinand utilise un réseau neuronal, placé entre les données d'entrée (les photos de bateaux) et celles de sortie (la reconnaissance d'un zodiac, par exemple). Ce réseau est capable de s'entraîner, sur la base d'opérations mathématiques, et de faire évoluer la façon dont les neurones transmettent l'information pour apprendre en continu au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles données. « Je teste des stockages de données très petits : 2 000 images, pas plus que la mémoire d'un smartphone, résume le doctorant. C'est ainsi que nous pourrons résoudre le problème à la racine. »

QUAND L'IA RÉSOUT LES PROBLÈMES ET LES ANOMALIES

Jérémy Trione, data scientist au COSIN, l'affirme : « Contrairement à ce que sous-tendent les œuvres de science-fiction, l'IA ne va pas remplacer l'humain. Bien au contraire, elle a vocation à l'aider. » Pour lui, les algorithmes permettent avant tout d'apporter des solutions. L'exemple de l'utilisation des électropompes incendie (EPI) sur le *Charles de Gaulle* est en ce sens révélateur. Le problème était de savoir si la gestion de ces équipements répondait bien aux besoins du porte-avions. « L'expert métier, qui avait constaté des défaillances, nous a fourni l'historique de fonctionnement. À partir de ces données et en moins de temps qu'il n'en faut pour le dire, nous avons réalisé une étude qui définit le seuil de pression à ne pas dépasser par les 17 EPI du navire, afin de conserver un niveau de fonctionnement optimal. Mieux : nous avons déterminé que le problème était d'origine mécanique, pas humaine. »

Autre bénéfice de l'IA, la résolution d'anomalies. L'objectif était de réduire le temps de traitement des fiches d'anomalies (FA) dans la base de données. Certaines peuvent rester ouvertes durant des mois, entre les différentes étapes de résolution (déclarée, validée, corrigée, appliquée). « L'IA permet d'accéder automatiquement à des retours d'expérience pour savoir si quelqu'un a rencontré cette anomalie et comment il l'a résolue, pour appliquer la même méthode. C'est un gain de temps et de qualité énorme. »

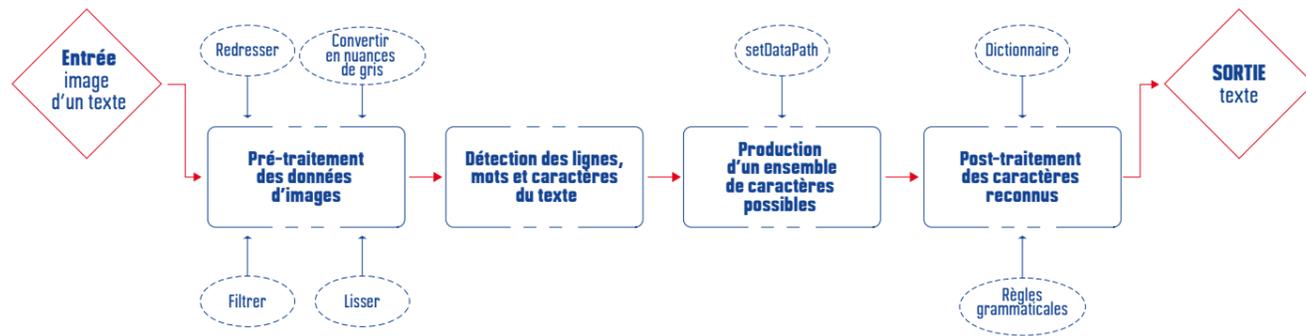


+ Schéma de principe de l'apprentissage du traitement des fiches d'anomalies (FA).

DE LA PAILLASSE À L'IA INDUSTRIELLE

Au sein de Naval Group, l'IA n'est pas uniquement un objectif de R&D. Elle est évidemment destinée à rejoindre les bâtiments navals et à être utilisée au quotidien. Or, le passage du laboratoire au projet ne va pas de soi. « Pour ce faire, confie Quentin Oliveau, nous livrons à nos équipes industrielles les algorithmes que nous avons conçus en R&D. Elles vont alors définir les interfaces réseaux pour que tous les algorithmes puissent communiquer entre eux, spécifier les protocoles et les contraintes matérielles. Elles déterminent la quantité de mémoire nécessaire, ou la consommation électrique. Bref : une série d'opérations pour que tout fonctionne et qu'on appelle le "portage d'algorithmes". »

Des démonstrateurs industrialisés ont ainsi été testés sur des applications de type lutte contre les menaces « asymétriques », sujet d'intérêt majeur pour la Marine. Dans ce cadre, ils sont intégrés à une chaîne de traitement permettant d'évaluer la dangerosité d'une embarcation. Sur le même principe, Naval Group a développé pour un client de plateforme offshore de stockage de gaz naturel au large du Mozambique, afin d'anticiper les risques de collision ou les éventuelles menaces. « Dans le cadre de ce projet, appelé Coral South, notre défi est d'arriver à détecter de très petits objets à l'horizon, qui ne dépassent pas quelques pixels, brouillés par les reflets du soleil sur les vagues. » Ces travaux montrent, en outre, que de nombreux travaux « duaux » (applicables au civil comme à la défense) sont possibles.



+ La reconnaissance optique de caractères (ROC ou OCR en anglais) permet à un système informatique de reconnaître le texte d'une image. Cette tâche, simple pour l'humain, l'est moins pour la machine qui ne « voit » que des pixels, parfois bruités avec des tailles et polices différentes. Les algorithmes mis en jeu pour cette tâche procèdent généralement de la façon suivante :

- **Pré-traitements de l'image** pour la normaliser, la débruiter, accentuer les contours de formes...
- **Détection des lignes, des mots et des caractères.** Selon la qualité de l'image, le texte n'est pas toujours positionné de manière parfaitement horizontale et les mots et les lignes pas toujours clairement séparés.
- **Reconnaissance de caractères.** Le procédé peut mettre en jeu plusieurs algorithmes, par exemple pour déterminer le mot le plus probable en fonction du contexte. C'est particulièrement utile lorsque les caractères sont semblables, comme 0 (zéro) et O (lettre).
- **Production du texte de sortie.**

EN INTERNE AUSSI, LA GESTION MASSIVE DE DONNÉES

Même quand il ne s'agit pas de fournir des produits aux clients, mais de développer des solutions pour les projets internes, l'industrialisation des algorithmes est incontournable. « Nous sommes chargés de l'automatisation en continu des flux de données, décrit Christophe Minutolo, data ingénieur au COSIN. Les chercheurs conçoivent un algorithme en langage Python, qui leur permet de valider rapidement son fonctionnement et de réaliser des tests sur leur ordinateur, mais pas d'automatiser le programme. » Pour l'industrialiser, Christophe Minutolo réécrit les codes en langage Java, par exemple, pour gérer d'importants volumes de données, tout en parallélisant le travail de l'IA avec plusieurs machines du COSIN à l'aide des interfaces

de programmation Spark. « Si vous trie un jeu de tarot, vous le ferez en 10 minutes. En partageant les cartes entre trois personnes, vous mettrez trois fois moins de temps. C'est le principe de "paralléliser" dans le Big Data. » Résultat : l'industrialisation a permis de passer de 200 fichiers de moins de 10 Mo océrés par heure à 6 000 par heure et d'être capable de traiter des fichiers de plusieurs Go ! Concrètement, le traitement de 29 902 documents, représentant 508 Go, l'« ingestion »* ainsi que l'OCR n'ont pris que 12 heures. « En une demi-journée, on est donc capable de gérer des volumes de données, qu'on traitait en plusieurs semaines. C'est une avancée majeure pour les process de Naval Group. »

* L'ingestion de données désigne le processus de collecte de data à partir de différentes sources et sa centralisation sur un site de destination, dans lequel elles sont prêtes à être analysées et utilisées.

03

ILS FONT LA SCIENCE À NAVAL GROUP

PAROLE DE DOCTORANT



”
**MA THÈSE A REPRÉSENTÉ UNE
FORMIDABLE OPPORTUNITÉ DE
DÉCOUVRIR DE NOUVEAUX HORIZONS
DANS LES SCIENCES NUMÉRIQUES**

■■■■■■■■■■
Damien MAVALEIX-MARCHESSOUX

Après un diplôme d'ingénieur de l'ENSTA Paris, Damien Mavaleix-Marchessoux a rejoint les équipes de Naval Group pour effectuer une thèse CIFRE en mathématiques appliquées, sous la double direction d'encadrants universitaires – Stéphanie Chaillat et Marc Bonnet, de l'ENSTA Paris – et d'un encadrant industriel – Bruno Leblé, de Naval Group, à Nantes. Une façon pour cet amoureux des maths de concilier recherche théorique et R&D débouchant sur des applications concrètes.

Comment en êtes-vous venu à faire une thèse après avoir obtenu votre diplôme d'ingénieur ?

Au départ, je voulais être enseignant en mathématiques. Puis, lorsque j'étais en terminale scientifique, une conférence donnée par un ingénieur m'a convaincu de m'engager dans cette voie d'études, notamment parce que ce métier permet de transformer de nouvelles connaissances théoriques en technologies grand public. Cet aspect a toujours été pour moi une grande source de motivation.

Lorsque j'étais en troisième année d'école d'ingénieur à l'ENSTA Paris, j'envisageais de poursuivre par une thèse à l'étranger. Mais cette année-là, l'un de mes professeurs, Stéphanie Chaillat, proposait un sujet de thèse CIFRE avec Naval Group.

Son thème – la propagation des ondes – m'intéressait beaucoup ; et une telle thèse était pour moi l'opportunité de concilier la physique et

les mathématiques appliquées, avec un besoin réel sur un projet précis et des débouchés dans la R&D d'entreprise. J'ai un motif de satisfaction supplémentaire : mes calculs, qui ont des applications militaires, sont transposables à des thématiques civiles, comme l'étude des séismes. Finalement, cela répond parfaitement à mon envie de participer à l'innovation en y apportant des compétences théoriques.

Quel est votre regard sur cette première expérience professionnelle entre industrie et académie ?

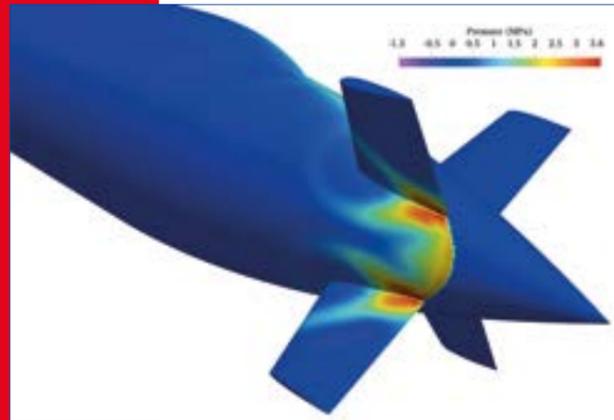
Le concept de la thèse CIFRE, sur ce sujet en particulier, correspond exactement à mon ambition initiale : participer à des sciences novatrices, intellectuellement éclairées par la théorie. De plus, j'ai le sentiment d'être acteur d'un bout à l'autre de l'innovation : je pars de la base théorique, des équations mathématiques qui régissent les phénomènes physiques ; puis je développe

une modélisation, en passant par des étapes d'optimisation très motivantes car elles obligent à simplifier – sans le fausser – un problème très complexe ; et finalement, je vais jusqu'à la mise en œuvre, par le calcul numérique des procédures que j'ai conçues.

Au-delà du thème de recherche, quels éléments vous ont incité à rejoindre Naval Group ?

Les deux partenaires encadrants de ma thèse sont des références en matière d'innovation mêlant mathématiques appliquées et propagation des ondes. Avec le laboratoire POEMS*, je savais que je bénéficierais d'un soutien académique de pointe sur ce sujet ; et intégrer un projet de R&D amont au CESMAN**, au sein d'une entreprise de la renommée de Naval Group, était une proposition que je ne pouvais pas refuser, d'autant moins avec

un sujet de thèse aussi intéressant et enrichissant ! Et je ne le regrette absolument pas : tout au long de ma thèse, j'ai aussi eu accès à des formations sur le calcul haute performance et le profiling, qui est une méthode très intéressante pour optimiser les calculs et tirer le meilleur parti des supercalculateurs. Après avoir soutenu ma thèse, en décembre 2020, je disposais d'une solide formation de numéricien. J'ai intégré les équipes de Naval Group, une chance pour un jeune ingénieur, tant les opportunités professionnelles y sont variées. Je travaille désormais au CEMIS*** sur des problématiques de pistage d'objets (bateaux, drones, etc.) se déplaçant autour d'un de nos navires ou sous-marins. Mes connaissances en mathématiques appliquées et en modélisation de phénomènes physiques, acquises lors de mes travaux de thèse, s'avèrent précieuses pour appréhender ce domaine, nouveau pour moi, et proposer des innovations.



+ Exemple de calcul sur un navire faisant face à une explosion sous-marine

La simulation, réalisée avec la méthode développée dans le cadre des travaux de thèse de Damien Mavaleix-Marchessoux, permet de déterminer le niveau de pression totale exercée sur l'objet immobile, quelques millisecondes après que l'onde incidente a touché le sous-marin. La qualité du calcul est illustrée par le front d'onde lisse qui se propage sur le fuseau. On vérifie que la causalité de l'onde est respectée, et on observe des phénomènes physiques connus, comme les multi-réflexions à l'arrière du sous-marin, lorsque l'onde rencontre les barres de direction.

Référence : B. Overpelt, B. Nienhuis et B. Anderson, *Free running manoeuvring model tests on a modern generic SSK class submarine BB2*, Pacific International Maritime Conference, Sydney, Australia, 2015.

MA THÈSE EN QUELQUES MOTS...

Mon sujet de thèse était la modélisation du couplage entre une structure et un fluide lors d'une explosion sous-marine en champ lointain. Cela implique de modéliser un sous-marin (qui est une structure déformable) et d'étudier l'impact sur sa coque d'une onde de choc qui se propagerait jusqu'à lui, dans l'eau. Je m'intéresse donc à la façon dont l'onde se transmet à la structure. Mon but est de concevoir une procédure performante qui soit la plus générale possible, pour pouvoir l'étendre à d'autres situations et même, par exemple, à l'impact de séismes sur des bâtiments.

Il existe plusieurs paramètres d'entrée : d'abord, la description du sous-marin par un réseau de mailles qui en détaille la géométrie ; également, les caractéristiques de l'explosion, notamment sa position par rapport au navire et son intensité. Ensuite, la simulation est réalisée en séparant d'une part la résolution de l'interaction entre l'onde de choc, qui se propage dans le fluide, et un sous-marin supposé rigide et immobile ; et, d'autre part, la prise en compte des déformations et de la réponse de la structure du sous-marin. Plus précisément, nous couplons les équations de propagation de l'onde de choc et les équations de structure en imposant une continuité de vitesses et de pression à la surface du navire, entre eau et coque, via des équations de continuité. Notre stratégie de résolution permet de réduire considérablement les temps de calcul.

Dans notre modèle, nous faisons deux hypothèses : la première est que la présence du sous-marin n'affecte pas l'explosion, ce qui est vrai quand cette dernière naît à une centaine de mètres du navire ; la deuxième est que l'onde de choc est séparée temporellement de la bulle oscillante de gaz chauds générée, elle aussi, par l'explosion. L'évolution de cette bulle de gaz est bien plus lente que celle de l'onde de choc : les échelles de temps sont respectivement de l'ordre de la seconde et de la milliseconde. La bulle se déplace lentement tout en se « gonflant-dégonflant » périodiquement et peut se révéler extrêmement destructrice si la période de ses oscillations correspond à la fréquence propre du sous-marin. Une prochaine étape, au-delà de ma thèse, sera d'étudier la transition entre les deux problèmes : l'interaction entre le sous-marin et l'onde de choc d'une part, et la réponse du sous-marin à la sollicitation de la bulle de gaz d'autre part.



+ Explosion à proximité d'un sous-marin (vue d'artiste).

* Le laboratoire POEMS (Propagation des Ondes : Étude Mathématique et Simulation) est une entité commune ENSTA Paris / CNRS / Inria.
 ** Le CESMAN (Centre d'Expertise des Structures et Matériaux Navals) est une unité de recherche et développement de Naval Research.
 *** Le CEMIS (Centre d'Expertise de Maîtrise de l'Information et des Signatures) est une unité de recherche et développement de Naval Group.

PAROLE D'EXPERT



LES MÉTHODES MATHÉMATIQUES ET NUMÉRIQUES NE CESSENT D'ÉVOLUER

Cédric LEBLOND

Après un début de carrière académique, Cédric Leblond a rejoint Naval Group en 2012. Sa mission ? En tant que responsable du domaine scientifique Méthodes numériques avancées, il apporte son expertise au développement d'outils de simulation numérique et anime des partenariats de R&D pour continuer de les faire évoluer.

Quel a été votre parcours professionnel avant de rejoindre Naval Group ?

Après un diplôme d'ingénieur en modélisation obtenu à l'école ENSEIRB-MATMECA de Bordeaux, en parallèle d'un master de recherche en mathématiques appliquées, j'ai entamé une thèse CIFRE en 2004, à Naval Group (alors DCNS), sur le dimensionnement aux explosions sous-marines de structures immergées.

En 2008, j'ai commencé ma carrière en tant qu'ingénieur de recherche au CNRS, à La Rochelle. Mon sujet principal portait sur la réduction mathématique de modèles et son application au contrôle des écoulements en temps réels. J'ai ainsi pu mettre en pratique mes compétences en hydrodynamique sur quatre projets différents de mathématiques appliquées.

Puis, en 2012, j'ai rejoint Naval Group au moment de la création de Naval Research, son centre de recherche technologique, en tant qu'ingénieur de recherche en calcul scientifique et simulation numérique, m'intéressant au développement de

méthodes numériques avancées. J'y apporte mon expertise technique dans des domaines divers comme la mécanique des fluides et des structures, l'acoustique et l'analyse de données. Je coordonne également des projets de recherche portant sur les mathématiques appliquées et les méthodes numériques avancées.

Quelles sont les applications concrètes des mathématiques mises en œuvre à Naval Group ?

Naval Group conçoit des navires qui ont des niveaux d'exigence élevés, par exemple en termes de résistance à des sollicitations sévères, de tenue à la mer, de comportement hydrodynamique, de durée de vie ou encore d'acoustique, de bruits, de vibrations, etc. Démontrer ces performances par le calcul requiert de formaliser des phénomènes physiques complexes. Dans le naval, les mathématiques appliquées sont utilisées dans de nombreuses simulations, par exemple d'interactions entre les structures des navires et le fluide les environnant. Il faut tout d'abord

décrire les processus impliqués, leurs relations, ce qui se fait au moyen de modèles mathématiques. Puis il faut résoudre les équations dont sont constitués ces modèles. Les mathématiques interviennent donc aussi pour transformer des équations et les adapter à un traitement numérique ultérieur. L'enjeu est de parvenir à des résolutions mathématiques et numériques portant sur des modèles très complexes, en réduisant le temps et les moyens informatiques nécessaires : idéalement, pour une application industrielle, chaque calcul doit pouvoir être réalisé en une semaine maximum et sur des calculateurs standards, en s'affranchissant de supercalculateurs.

Mon domaine d'expertise principal est la « réduction de modèles », une façon de formuler les problèmes mathématiques, qui permet des calculs rapides représentant néanmoins une physique complexe. Il devient alors possible d'utiliser les données calculées pour fonder des approches probabilistes. Nous travaillons aussi sur des sujets plus théoriques, comme la reformulation des fonctions de Green, présentes dans de nombreux modèles utiles à Naval Group (acoustique, mécanique, etc.)

Pour résumer, l'objectif de nos recherches est d'œuvrer à la simplification des simulations et à l'amélioration de leur performance, en particulier en termes de ressources de calcul, tout en garantissant leur précision. Nous qualifions systématiquement le degré de confiance de nos résultats, afin de connaître précisément les marges d'erreur. Nous pouvons ainsi à la fois affiner nos méthodes mathématiques à bon escient et assurer nos clients du sérieux de nos méthodes de conception. Sur ces sujets, la R&D se fait en interne mais aussi dans le cadre de partenariats de recherche avec des équipes académiques et d'autres industriels, notamment *via* des thèses CIFRE. Ces collaborations nous permettent de développer des méthodes de calcul innovantes, que chaque partenaire adapte ensuite à son propre métier - comme nous le faisons avec EDF R&D depuis cinq ans, par exemple.

LES OUTILS NUMÉRIQUES, UN VOLET IMPORTANT DES RECHERCHES DU CESMAN

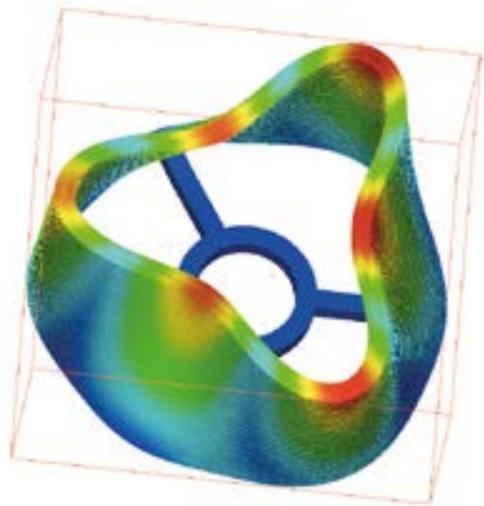
Le CESMAN (Centre d'Expertise des Structures et Matériaux Navals) réunit, au sein de Research, des compétences dans la caractérisation des matériaux et dans l'étude des structures. Pour des études transverses, fondées sur des phénomènes physiques complexes, 10 ingénieurs-chercheurs regroupés au sein du département S3M (Simulations et Méthodes pour la Mécanique et les Matériaux) optimisent des simulations mathématiques et numériques. Leur objectif : démontrer et renforcer les performances des navires, aussi bien dans leur résistance aux chocs que dans leur discrétion acoustique par exemple. Le CESMAN assure à la fois des interventions en support des équipes de Naval Group, qui ont besoin d'une expertise sur des matériaux ou des conceptions structurelles, et un important travail de R&D amont.

Pouvez-vous nous en dire davantage sur vos axes de recherche actuels ?

Nous sommes toujours en veille sur les avancées académiques accomplies en mathématiques et sciences numériques, pour appliquer aussi rapidement et aussi efficacement que possible des méthodes émergentes aux problématiques spécifiques à Naval Group. Depuis 2021, nous travaillons notamment sur l'hybridation des modélisations avec des données mesurées, afin de les intégrer aux outils utilisés à Naval Group. À terme, l'enjeu est de parvenir à la surveillance des structures des navires en temps réel. Pour cela, nous combinons des modèles numériques avec des données mesurées en temps réel. C'est un vrai défi numérique, qu'il n'est possible de relever qu'avec des méthodes mathématiques très récentes. Nous souhaitons aussi intégrer des techniques d'intelligence artificielle dans nos modélisations

mathématiques. Outre les modèles réduits et les données de mesure, ce troisième élément s'avère en effet indispensable pour différencier un comportement normal d'un comportement anormal, et pour apporter certaines données manquantes.

Nous travaillons également à améliorer les modèles mathématiques relatifs à la turbulence : en mécanique des fluides, modéliser les tourbillons à toutes les échelles autour d'un navire en mouvement n'est à ce jour pas encore accessible aux industriels. Et, là aussi, l'intelligence artificielle pourrait s'avérer efficace, en fournissant aux équations et modèles mathématiques des données inaccessibles par simulation numérique. Cette hybridation entre modèles et données offre des perspectives intéressantes pour la résolution des problèmes complexes auxquels les ingénieurs et concepteurs peuvent être confrontés.



+ Des modèles numériques « multi-physiques »

La simulation représentée donne le comportement vibratoire d'une tuyère de propulsion, dont les vibrations sont amorties par un dispositif spécifique. Le calcul, qui permet d'estimer le bruit rayonné par cette structure, est fondé sur un modèle mathématique « multi-physique », décrivant le comportement mécanique et acoustique de matériaux métalliques et viscoélastiques, ainsi que du fluide environnant.

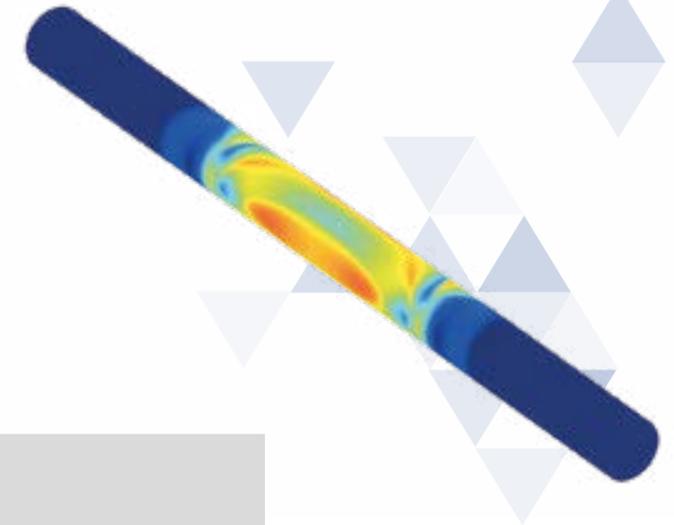


+ Réduction de modèle et calcul innovant

Les techniques de « réduction de modèle » permettent par exemple de réaliser un calcul mécanique complexe - ici l'étude vibratoire d'un propulseur - et d'en illustrer le fonctionnement en temps réel, sur un support aussi léger qu'une tablette numérique.

+ Des modélisations « analytiques »

Le calcul représenté montre l'état de contraintes dans une coque immergée subissant les effets d'une onde de pression, engendrée par une explosion sous-marine. Il est issu d'une modélisation analytique, c'est-à-dire fondée directement sur un modèle mathématique dont la solution est écrite en une équation explicite, calculable de façon rapide.



BIBLIOGRAPHIE

- Q. Rakotomalala *et al.*, *Approche fluide-structure pour l'étude mécanique et vibratoire des pâles de propulseur*, 15^e Colloque national en calcul des structures, Giens, 2022.
- Q. Rakotomalala *et al.*, "An advanced semi-analytical model for the study of naval shock problems", *Journal of Sound and Vibration*, 2021.
- M. Slama *et al.*, "A Kriging-based elliptic extended anisotropic model for the turbulent boundary layer wall pressure spectrum", *Journal of Fluid Mechanics*, 2018.
- C. Leblond *et al.*, *A goal-oriented model reduction technique for parametric fluid-structure problems*, 6th European Conference on Computational Mechanics - 7th European Conference on Computational Fluid Dynamics, Glasgow, 2018.
- J.F. Sigrist, C. Leblond, *Interactions fluide-structure - Modèles mathématiques et numériques pour le génie naval*, ISTE Editions, 2022.

CONSEIL SCIENTIFIQUE

JOËL BERTRAND,
PRÉSIDENT DU CONSEIL SCIENTIFIQUE
DE NAVAL GROUP : « UNE INSTANCE FAITE
POUR BOUSCULER »

« Vous êtes là pour imaginer l'inimaginable... et pour nous bousculer. » En 2016, quand il a créé le Conseil scientifique, c'est en ces termes qu'Hervé Guillou, alors PDG de Naval Group, avait décrit leur mission aux 13 membres qui le composent. Ces derniers sont des chercheurs de multiples disciplines : énergie, matériaux, génie des procédés, mais aussi sociologie, philosophie, sciences de gestion... « Et ils s'expriment en leur nom propre, quel que soit leur organisme de rattachement », souligne Joël Bertrand, directeur de recherche émérite au CNRS et président de ce conseil depuis 2016.

Le Conseil scientifique émet des avis sur des thèmes qui lui sont soumis ; par exemple, il a pris position sur la stratégie « batteries » du groupe. Il travaille en salle, mais aussi sur le terrain : des visites ont déjà eu lieu à Cherbourg, sur le chantier de construction d'un sous-marin, et à Toulon pendant une maintenance du porte-avions *Charles de Gaulle*.

Il peut aussi s'emparer à son initiative de tout sujet de son choix, qu'il soit d'actualité ou futuriste ; par exemple, le bien-être du sous-marinier ou l'avenir des navires de défense non habités. « Nous ne sommes pas là pour évaluer, mais pour orienter, précise Joël Bertrand. Notre mission comprend aussi l'identification d'universités étrangères réputées, en particulier quand elles ont des activités de recherche en défense et peuvent être des portes d'entrée pour Naval Group. »

UNE CONTRIBUTION AUX RÉFLEXIONS SUR LE QUANTIQUE

Pour avancer sur des thématiques en phase avec les enjeux et défis de Naval Group, des groupes de travail impliquent des membres du Conseil scientifique. Ces réflexions et analyses débouchent généralement sur un rapport établissant un bilan du sujet et de son niveau de maturité au sein de l'entreprise, et fournissant des recommandations – en matière de développement de compétences, de partenariats, etc. Dans le cas du rapport quantique (voir l'encadré), la démarche a été un peu différente. « Nous avons été sollicités pour analyser le rapport et ses conclusions, en le corrélant à nos connaissances du sujet et à l'actualité, celle du lancement du programme national sur le quantique. », explique Dominique Vernay, membre de l'Académie des technologies et ancien directeur technique du Groupe Thales.

« À nos yeux, ce rapport, très fouillé et complet, propose un positionnement adéquat de Naval Group comme entreprise intégrant des technologies, ici le quantique, en pleine évolution et posant nombre de questions ouvertes. », ajoute Brigitte Plateau, professeure à Grenoble INP et déléguée à la stratégie des alliances européennes. Pour les deux membres du Conseil scientifique, l'investissement principal du groupe doit être avant tout en matière de compétences : il s'agit de disposer d'experts couvrant suffisamment de sujets pour comprendre ce que les technologies quantiques peuvent apporter aux problématiques de Naval Group.

« Le sujet quantique a réellement émergé en 2020, avec la décision de la Direction technique et innovation de constituer un groupe de travail, conduit par le Naval Innovation Hub. Nous avons interviewé des représentants d'entreprises, de start-ups, de laboratoires de recherche, pour en savoir davantage sur le management de l'innovation, les cas d'usage et les premiers retours d'expérience. Le rapport qui en a été issu a débouché sur une mission spécifique, que je pilote avec un budget dédié : prioriser les recommandations du rapport, les approfondir et commencer les expérimentations.

Nous avons notamment testé une application à l'optimisation de trajectoire de sous-marin, en la modélisant avec une formulation quantique. D'autres actions concernent les capteurs, que le Conseil scientifique a considérés comme un axe prioritaire. L'acquisition de trois capteurs quantiques nous permettra de tester la technologie en conditions réelles sur le porte-avions *Charles de Gaulle*. » **Romain Kukla, pilote de la stratégie quantique.**

UN LABEL POUR IDENTIFIER ET RECONNAÎTRE LES COMPÉTENCES SCIENTIFIQUES

En 2022, Naval Group a sollicité des membres du Conseil scientifique pour siéger au sein de l'instance qui désigne les experts et experts seniors. L'objectif : pouvoir adosser un label scientifique à certains de ces profils. Les explications de **Thierry Massard**, ancien directeur scientifique du CEA, et de **Jean-Luc Fihey**, directeur de la valorisation Recherche et Innovation de l'ETS (École de technologie supérieure) de Montréal.

Thierry Massard : Pour répondre à ses enjeux S&T, Naval Group a besoin de développer ses relations avec le milieu académique, en s'appuyant sur des collaborateurs en mesure de créer ou de renforcer ces liens. Jean-Luc Fihey et moi-même avons donc réfléchi aux critères permettant d'apprécier le fait scientifique au-delà de l'expertise technique : doctorat, HDR, publications dans des revues de rang un, deux ou

trois, participation à des conférences, etc. Nous avons travaillé avec Vincent Geiger, directeur scientifique, et la DRH à l'établissement d'une typologie de labellisation, sur la base d'une analyse critique de l'existant.

Jean-Luc Fihey : Cette cartographie des compétences est indispensable. La science évolue de plus en plus rapidement, ce qui implique à la fois que

les experts se tiennent informés de ces avancées, et qu'ils soient en mesure de contribuer aux innovations de rupture. Naval Group réalise déjà de la recherche de grande qualité, qui va pouvoir encore monter en puissance. Le prix La Pérouse (voir l'encadré) participe de la même dynamique vertueuse : favoriser l'émergence de projets ambitieux, avec une vision long terme, en libérant les forces créatrices de Naval Group.

PRIX LA PÉROUSE : EXPLORER DES SUJETS SCIENTIFIQUES NOUVEAUX

« Nous avons proposé, il y a cinq ans, d'instaurer un prix scientifique centré sur l'innovation et la recherche, explique Sophie Brétesché, professeure de sociologie à l'IMT Atlantique et membre du Conseil scientifique. Il s'agit d'encourager des collaborateurs de Naval Group à explorer des sujets scientifiques nouveaux, utiles à terme aux produits et aux services de l'entreprise. » Le jury fonde sa sélection sur l'examen de dossiers écrits et un échange avec les porteurs de projets. « Nous valorisons l'interdisciplinarité et la prise de risque, car l'innovation est un processus collectif et incertain ! » Le prix permet aux lauréats de financer des tâches exploratoires et le jury évalue dans la durée leurs apports à l'entreprise. En 2021, Cédric Leblond et Émilien Billaudeau, lauréats de l'édition 2020, ont par exemple développé une méthode de suivi en temps réel de structures, fondée sur l'analyse de données de mesure et des modélisations mathématiques avancées.

04

MÉCANIQUE DES FLUIDES

DES MODÈLES ULTRA-PUISSANTS POUR OPTIMISER LA PROPULSION DES SOUS-MARINS

Grâce au développement de la simulation numérique, les ingénieurs sont aujourd'hui capables de définir plus rapidement, et à moindre coût, la performance des échangeurs de chaleur, composants essentiels des systèmes de propulsion des sous-marins nucléaires. Et d'imaginer de nouveaux concepts. À l'origine : une collaboration entre le site d'Indret et Nantes Université qui a débouché sur le développement d'un outil inédit de modélisation par couplage 1D/3D, quatre thèses et plusieurs publications scientifiques.

La découverte était plutôt fortuite. En 2011, Vincent Mélot, ingénieur d'études et de recherche en thermo-hydraulique du site Naval Group d'Indret, repère dans la littérature scientifique des résultats de recherche prometteurs sur la modélisation des échangeurs de chaleur. « Nous cherchions à développer des outils de modélisation afin d'ajuster le dimensionnement de ces équipements et là, pour la première fois, j'avais sous les yeux une vraie piste de solution. », se souvient-il.

Composés de plusieurs milliers de tubes intégrés dans une calandre, les échangeurs de chaleur constituent l'un des équipements les plus importants mais surtout les plus volumineux du navire. En propulsion nucléaire, ils assurent les transferts thermiques entre différents circuits. Le générateur de vapeur permet de convertir l'énergie issue de la réaction nucléaire en vapeur utilisée par la turbine du sous-marin pour faire tourner son hélice, tandis que le condenseur refroidit ensuite cette vapeur, au contact d'un circuit d'eau de mer.



POUSSER LA PERFORMANCE THERMIQUE POUR ALLÉGER LES NAVIRES

Déterminer les caractéristiques thermo-hydrauliques des échangeurs de chaleur est un élément déterminant du cahier des charges des constructeurs pour atteindre les performances propulsives requises des navires. Et la simulation numérique constitue pour cela un outil privilégié. Les équipes d'Indret se sont ainsi rapidement tournées vers l'expertise en analyse de transfert de chaleur de son partenaire historique local, le Laboratoire de Thermique et Énergie de Nantes (LTEN), à Polytech Nantes, pour développer un outil capable de modéliser les physiques attendues. Il faut dire que les contraintes d'emménagement à bord sont fortes. « Les puissances d'échanges en jeu

dans les échangeurs de chaleur sont colossales, et les dispositifs toujours plus compacts. », résume Vincent Mélot. L'objectif ? Alléger les navires, réduire le coût de l'équipement et faciliter la circulation des équipages chargés des opérations de maintenance. Pour les échangeurs de chaleur, l'augmentation de la taille n'est par conséquent pas une option. « Dans une centrale nucléaire au sol, quelques rangées de tubes supplémentaires suffisent à augmenter la puissance thermique d'un équipement. », explique Bruno Auvity, chercheur au LTEN. Dans l'espace très compact qu'est le sous-marin, chaque équipement est taillé au plus près du besoin.

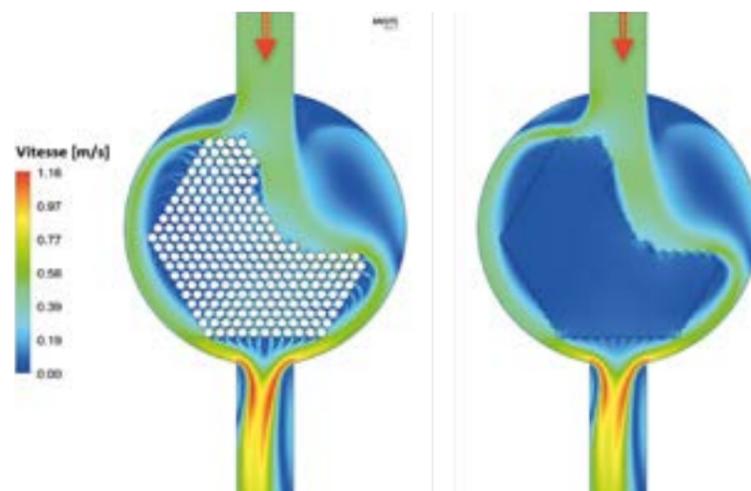
UN COUPLAGE 1D/3D POUR DÉCRIRE LES TRANSFERTS THERMIQUES

Inspirées des publications identifiées, deux thèses CIFRE, l'une conduite par Clément Bonneau entre 2014 et 2017, et l'autre par Loïck Kalioudjoglou entre 2016 et 2019, ont permis de définir les premières briques d'un modèle de calcul capable de caractériser finement les performances thermiques et hydrauliques, respectivement des condenseurs et des générateurs de vapeur. « À l'aide de ces thèses et des collaborateurs de l'équipe calcul fluide d'Indret, nous avons développé un outil de modélisation par couplage 1D/3D extrêmement puissant, à la fois plus rapide et précis, qui est maintenant utilisé quotidiennement dans les phases de conception. », explique Vincent Mélat.

Ce modèle repose pour une part sur le couplage entre deux approches : des modélisations 1D, qui permettent de décrire, à grande échelle, l'écoulement simple d'un fluide dans un tube lorsque celui-ci s'écoule dans un seul sens ; et des calculs CFD* pour modéliser l'écoulement à l'extérieur des tubes, fondés sur des méthodes numériques résolvant les équations de Navier-Stokes – qui décrivent les mouvements tridimensionnels des fluides, à des échelles plus petites. Néanmoins, modéliser en 3D des écoulements complexes, comme celui du fluide qui circule entre plusieurs milliers de tubes, s'avère coûteux en termes de temps de calcul. L'autre fondement de ce modèle est le recours à un milieu poreux équivalent aux tubes, obtenu en incorporant aux équations de Navier-Stokes des termes sources de pertes de charges et de transferts thermiques. Pour décrire finement les transferts thermiques dans les échangeurs, il s'avère en effet indispensable de combiner ces approches, d'où le développement de cette modélisation hybride 1D/3D.

+ Écoulement du fluide extérieur tube (champ de vitesse) dans un échangeur de chaleur

À gauche, une simulation où les tubes sont effectivement pris en compte et à droite le résultat du modèle numérique développé.



UN JUMEAU NUMÉRIQUE POUR SIMULER LA BOUCLE ÉNERGIE-PROPULSION

« À partir là, nous avons pu proposer des pistes de solution innovantes pour réduire les pertes thermiques et hydrauliques et améliorer la densité de puissance thermique des appareils. », ajoute Bruno Auvity. Par exemple, en chassant les poches d'air figées dans les condenseurs. En effet, le condenseur étant sous vide, c'est-à-dire avec une pression inférieure à la pression atmosphérique, de l'air peut s'infiltrer dans le circuit. L'air étant un gaz incondensable, ce dernier empêche le bon établissement des transferts thermiques et donc de la condensation de la vapeur. Dans la recherche de solutions, des simulations numériques, précises et rapides, s'avèrent alors décisives afin de modifier la géométrie pour capter cet air.

Plus encore, une troisième thèse, conduite par Claire Dubot entre 2018 et le printemps 2022, a permis de valider le modèle sur des temps de calcul encore plus courts. Et une quatrième sera lancée à l'automne 2022 pour le développement d'un jumeau numérique qui permettra des simulations fines de l'ensemble de la boucle énergie-propulsion.

”

« Ce projet nous a permis de développer considérablement notre force de calculs, tout en gardant la même précision »

Vincent Mélat

OPTIMISER LA SURFACE D'ÉCHANGE ET PRÉVENIR LES RISQUES D'ENCRASSEMENT

Pièces maîtresses de la production d'énergie électrique et mécanique, et donc, de la vie à bord, les condenseurs sont des équipements encombrants dont la conception nécessite un dimensionnement au plus juste. Au nombre de deux, constitutifs de ce que l'on appelle le berceau de l'appareil moteur et situés sous la turbine, ils mesurent chacun environ 3 mètres de haut sur 4 mètres de long et 3 mètres de large. Ce sont aussi des équipements coûteux et très exposés. « L'outil de simulation développé sur le site d'Indret va permettre de faire varier les surfaces d'échange et les matériaux, pour optimiser la taille du composant et prévoir les marges d'encrassement des appareils. », explique Pierre Berg, directeur technique Équipements de propulsion chez Naval Group. En effet, le challenge lors de la conception d'un appareil moteur de sous-marin est de loger l'ensemble du système dans le volume alloué. Pouvoir alors prédire les performances d'un condenseur ou d'un échangeur est important afin d'évaluer si l'équipement répond aux exigences dès les premières phases d'étude, et de lever les risques au plus tôt. Cet outil de simulation numérique permettra également d'expérimenter de nouvelles architectures d'échangeur et de condenseur en limitant les phases d'essais longues et coûteuses.

BIBLIOGRAPHIE

- C. Dubot, *Mise au point de modèles d'homogénéisation et de réduction pour le développement de nouvelles technologies d'échangeurs*, Thèse de doctorat, 2022.
- C. Dubot *et al.*, "Numerical prediction of two-phase flow through a tube bundle based on reduced-order model and a void fraction correlation", *Entropy*, 2021.
- C. Bonneau *et al.*, "Comprehensive review of pure vapour condensation outside of horizontal smooth tubes", *Nuclear Engineering and Design*, 2019.
- L. Kalioudjoglou, *Modélisation et simulation numérique pour le développement de nouvelles technologies d'évaporateurs*, Thèse de doctorat, 2019.
- C. Bonneau, *Caractérisation des performances thermiques et hydrauliques d'échangeurs de chaleur par l'utilisation de milieux équivalents*, Thèse de doctorat, 2017.

* CFD « Computational Fluid Dynamics » désigne les techniques de calcul sur ordinateur permettant de simuler les écoulements de fluides.

MIEUX COMPRENDRE LES PHÉNOMÈNES DE TURBULENCE POUR UNE MEILLEURE DISCRÉTION ACOUSTIQUE

Pour la première fois à Naval Group, un modèle a permis de simuler « rapidement », et dans différentes conditions, les turbulences des écoulements hydrodynamiques près de la coque, à l'origine du rayonnement acoustique et de la fatigue des navires. Le verrou technologique a été levé, entre 2017 et 2019, grâce aux travaux engagés avec Nantes Université, l'École Centrale de Nantes et La Rochelle Université, dans le cadre du projet ASTRID « Modulo π ». Financés par la DGA (Direction générale de l'armement) et coordonnés par Cédric Leblond, ingénieur en modélisation au CESMAN, les travaux ont permis de combiner les outils de simulation LES (Large Eddy Simulation), opérée par Sirehna, et les méthodes de réduction de modèle.

Pour augmenter la discrétion acoustique des navires et leur durée de vie, les concepteurs réfléchissent à une combinaison de géométries et de matériaux composites innovants. Leur objectif ? Minimiser la masse des appendices ainsi que leur vibration, tout en optimisant les performances hydrodynamiques. Seulement la tâche n'est pas simple. « Nous n'avons pas ou peu de retours d'expérience sur la tenue à la mer pour les configurations innovantes. », indique Cédric Leblond, ingénieur en modélisation au CESMAN. Les situations opérationnelles couvrent, de plus, une large gamme d'écoulements et aucun modèle numérique n'est capable de calculer « rapidement » les effets des écoulements turbulents sur les structures dans toutes ces conditions. Enfin, jusqu'à présent.

UNE COUCHE LIMITE TURBULENTE DIFFICILE À MODÉLISER

La principale difficulté est de rendre compte de phénomènes physiques complexes, peu aisés à représenter en mécanique des fluides : la turbulence, et en particulier les « décollements » de l'écoulement dans la couche limite turbulente, au plus près de la carène. À l'avant du navire, l'écoulement est dit « laminaire » : il est constitué de couches de fluide glissant les unes sur les autres. Mais rapidement, le long de la coque, l'écoulement devient turbulent, mêlant des tourbillons de tailles et d'énergies variées. « Entre ces deux régimes, laminaire et turbulent, il existe une couche fluide très cisailée qui génère des instabilités hydrodynamiques et des tourbillons, dont l'évolution est mal connue. » La fameuse couche limite turbulente.

Dans le cas d'un profil courbe, comme pour un appendice de coque ou une pale d'hélice, un gradient de pression s'ajoute au cisaillement, rendant la couche limite turbulente singulière, c'est-à-dire instable. Les tourbillons induits sont alors si importants qu'ils génèrent des détachés tourbillonnaires. « Ce sont eux qui posent problème parce qu'ils sont difficiles à simuler. Leur zone d'apparition dépend de la vitesse ou de l'angle d'incidence, précise Cédric Leblond. De plus, les calculs peuvent prévoir des zones d'apparition différentes selon les modèles et les méthodes de discrétisation utilisées... »



GAGNER EN RAPIDITÉ DANS LE CALCUL DU CHARGEMENT HYDRODYNAMIQUE

La solution ? Prendre en compte les aléas dans les modèles. Entre janvier 2017 et décembre 2019, les ingénieurs du CESMAN et de Sirehna, avec les équipes du Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE), une UMR La Rochelle Université/CNRS, et de l'Institut de Recherche en Génie civil et Mécanique (GeM), une unité mixte de recherche Nantes Université/École Centrale de Nantes/CNRS, se sont attelés à mettre au point une méthode de calcul plus rapide du chargement hydrodynamique.

Celle-ci tient compte de la variabilité des paramètres en permettant de propager cette incertitude dans le calcul. On englobe ainsi un

grand nombre de valeurs possibles de ces paramètres à moindre coût. Ces travaux ont été réalisés sur un cas d'étude : un profil portant de type NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), long d'une vingtaine de centimètres. « Dans ce projet, nous avons développé une approche largement utilisée dans le domaine de l'aéronautique et l'automobile (les techniques dites de "couplage faible fluide-structure", valables pour l'aérodynamique), mais totalement innovante dans le domaine naval (les techniques dites de "couplage fort fluide-structure", valables pour l'hydrodynamique), et qui a permis de lever partiellement ce verrou. », poursuit Cédric Leblond.

SIMULER EN MÉTHODE « LES »

La difficulté était de disposer rapidement des résultats de calculs fins associés à tous les écoulements possibles autour du profil NACA retenu. Sur ce sujet complexe, il était particulièrement important d'avancer avec précaution et de manière maîtrisée et concertée, à chaque étape du développement. Dans un premier temps, il a fallu créer une base de données caractérisant finement l'écoulement. Pendant plusieurs semaines, les équipes de Sirehna ont ainsi fait tourner leurs puissants calculateurs et simulé différents cas de chargement hydrodynamique avec une méthode LES (voir l'encadré) à différentes vitesses d'écoulement (jusqu'à 20 nœuds) et pour différents angles d'inclinaison du profil. Afin de produire une base de données encore plus grande, le LaSIE a, dans un second temps, utilisé ces premières données pour mettre en place un modèle d'ordre réduit, capable de donner un résultat en quelques minutes. Un important travail de production de données a ensuite été réalisé à La Rochelle pour permettre l'élaboration

d'un méta-modèle restituant la pression du fluide turbulent sur la paroi et fonctionnant en une fraction de seconde.

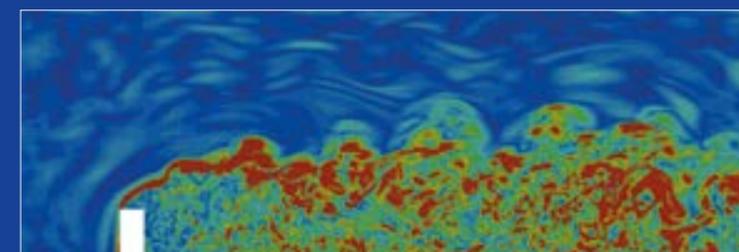
Ce méta-modèle a été développé par l'équipe du GeM, à l'aide de méthodes assimilables à des techniques d'intelligence artificielle, pour constituer un outil permettant de calculer rapidement des chargements hydrodynamiques. Cet outil a enfin été transmis au CESMAN qui a réalisé les calculs de vibro-acoustique. L'analyse des résultats a réservé quelques surprises aux ingénieurs (voir l'encadré). « Cette méthodologie innovante, couplant modélisation mathématique et analyse de données physiques, ouvre la voie à d'autres travaux et élargit l'analyse à des structures plus réalistes qu'un profil NACA : par exemple les quilles antirouillis. Réaliser des calculs LES sur ces structures, qui peuvent atteindre plusieurs mètres, nécessitera des puissances de calcul plus importantes, et le recours à des supercalculateurs comme on en trouve au CEA. », conclut Cédric Leblond.

OBTEINIR UNE BASE DE DONNÉES DE « HAUTE FIDÉLITÉ » AVEC DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Deux méthodes permettent d'étudier, au moyen de simulations numériques, l'écoulement d'un fluide turbulent – ce phénomène aléatoire et tridimensionnel si difficile à appréhender.

- La méthode RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) est une technique simple et économique qui vise à obtenir rapidement une solution moyenne des fluctuations des champs de pression et de vitesse dans l'écoulement. Cette méthode est en général utilisée pour déterminer des grandeurs « globales », comme des efforts hydrodynamiques sur un profil portant.
- La méthode de simulation des grandes échelles LES (Large Eddy Simulation) permet quant à elle de résoudre la turbulence, au moyen d'une discrétisation spatiale et temporelle très fine. Les échelles de turbulence plus petites que la taille du maillage sont alors filtrées et modélisées tandis que les grandes échelles, contenant la plus grande partie de l'énergie de l'écoulement, sont entièrement résolues.

« C'est cette seconde méthode que nous avons appliquée dans le projet Modulo π , précise Luc Bordier, ingénieur chez Sirehna. Notre équipe devait produire des calculs "haute fidélité" pour des écoulements autour d'un appendice expérimental donné. » Dans un premier temps, l'équipe a réalisé un maillage du fluide contenant plusieurs dizaines de millions de cellules. Puis elle a mis en œuvre les simulations proprement dites, mobilisant des moyens informatiques conséquents (des milliers de cœurs pendant des centaines d'heures de calculs). « Nous avons ainsi obtenu, pour la première fois, une base de données caractérisant la turbulence dans une dizaine de configurations, définies par des vitesses et des angles d'inclinaison variables du profil portant. », ajoute son collègue Jean-Charles Poirier.

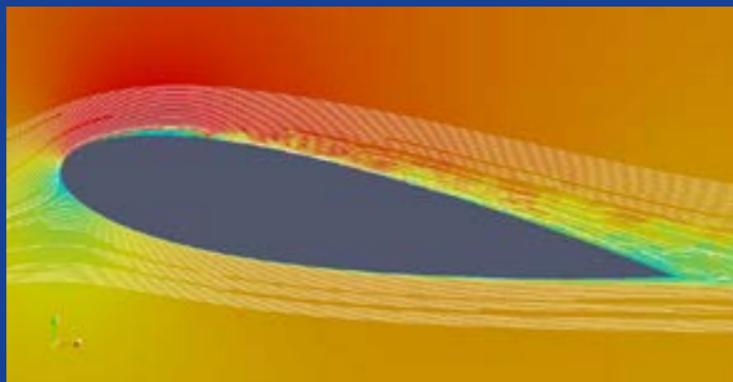


Deux méthodes pour appréhender la turbulence (exemple de simulations CFD derrière un obstacle)

Les figures mettent en évidence la différence entre les méthodes RANS (*en haut*) et LES (*en bas*) sur une même configuration : plus précis que le calcul RANS dans sa description des échelles turbulentes, le calcul LES demande des moyens de calcul et de stockage de données plus importants. Il permet d'accéder à des informations « locales et instantanées », quand le calcul RANS restitue des données plus « globales et moyennées ».

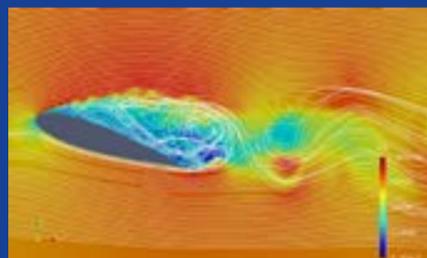
QUAND LES SIMULATIONS RÉVÈLENT DES PHÉNOMÈNES INATTENDUS

La richesse de la physique résolue par la méthodologie LES (Large Eddy Simulation) a livré des informations nouvelles, plutôt contre-intuitives, laissant entrevoir aux ingénieurs de nouvelles pistes d'analyse. « *Non seulement nous avons observé tous les phénomènes attendus autour de l'appendice NACA mais nous sommes allés au-delà, s'enthousiasme Cédric Leblond. Nous avons pu suivre l'évolution instantanée de l'écoulement : du stade laminaire, stable, jusqu'à la formation des ondes de transition laminaire/turbulent qui précède la mise en place du phénomène pleinement turbulent.* » Et là, surprise. Les résultats ont montré que les situations « extrêmes » pour un profil portant – vitesse la plus élevée et angle d'inclinaison le plus fort – n'étaient pas nécessairement les plus dimensionnantes pour cette structure du navire. « *Les niveaux vibratoires et les niveaux de contraintes les plus importants ont été observés pour des configurations intermédiaires, par exemple des angles d'inclinaison de 6 ou 8 degrés, et pour des détachés tourbillonnaires engendrés, non pas du bord d'attaque jusqu'au bord de fuite, mais sur une partie du profil seulement.* »



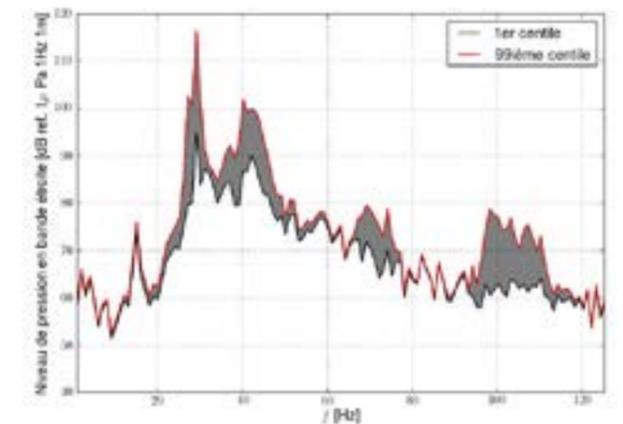
+ Des calculs d'écoulements turbulents au plus proche de la physique

Exemples de calculs LES réalisés sur le profil NACA à haut nombre de Reynolds, avec des angles d'incidence de 10° (en haut) et de 18° (à droite) : ces simulations permettent de capter des phénomènes physiques complexes.



« TOUCHER DU DOIGT LA RÉALITÉ INDUSTRIELLE »

« *La collaboration autour du projet Modulo π a été très fructueuse et a abouti à plusieurs publications* », se réjouit Cyrille Alléry, chercheur au LaSIE de La Rochelle Université. L'équipe se connaissait bien avant le projet pour avoir déjà travaillé ensemble. « *En tant que chercheurs, nous avons l'habitude de travailler sur des applications de recherche académique. Cela me paraît important de passer à des échelles réelles, qui nous font toucher du doigt la réalité industrielle en même temps qu'elles font avancer nos travaux.* » Pour Mathilde Chevreuil, chercheuse au GeM à Nantes Université, les travaux d'extrapolation engagés dans le projet ont permis de pousser les techniques de machine learning. « *J'ai obtenu des résultats satisfaisants, couvrant des domaines inexplorés, ce qui a permis aux ingénieurs du CESMAN* de réaliser des calculs pour les applications intéressantes Naval Group. Ce n'est pas toujours quantifiable immédiatement, mais je sais que des développements mathématiques et numériques nouveaux trouveront leur usage dans un prochain projet de recherche.* »



BIBLIOGRAPHIE

- C. Leblond et al., *Toward the vibro-acoustic response prediction of a curved plan under a turbulent boundary layer*, Flinovia III, 2019.
- C. Leblond et al., *A goal-oriented model reduction technique for parametric fluid-structure problems*, ECCM6/ECCFD7, 2018.

+ Prendre en compte les incertitudes dans les calculs

Exemple de calcul du spectre de pression rayonnée aléatoire, générée par la vibration d'un profil portant excité par un écoulement turbulent, avec prise en compte de la propagation d'incertitudes des paramètres matériaux.

* Le CESMAN (Centre d'Expertise des Structures et Matériaux Navals) est une unité de recherche et développement de Naval Research.

MODÉLISER LA HOULE ET SES IMPACTS POUR MIEUX DIMENSIONNER LES STRUCTURES

Pour la première fois, les équipes de Sirehna ont réussi à modéliser et à calculer la probabilité d'occurrence de chargements hydrodynamiques critiques pour les appendices. Ces travaux, réalisés entre 2018 et 2021 dans le cadre du projet Astrid « Apphy », ont fait l'objet d'une vaste collaboration avec Naval Group Lorient, l'ENSTA Bretagne, Ifremer et Bureau Veritas. Ils visent à dimensionner au plus juste la structure et les équipements des navires.

Cinq tonnes d'eau de mer par mètre carré. C'est la pression qu'un appendice de coque doit être capable de supporter dans des conditions extrêmes. Inscrit dans la réglementation dans les années 2000, ce chiffre et l'ensemble des valeurs forfaitaires de la structure conditionnent en partie l'épaisseur des matériaux qui constituent la coque, la charpente, les ailerons de stabilisation et plus largement, toute la structure du navire. « Ces valeurs forfaitaires sont essentielles, explique Sébastien Le Niliot, responsable du service Calculs des structures chez Naval Group à Lorient. Si elles sont sous-dimensionnées, elles peuvent générer des avaries et des réparations coûteuses. Ceci a parfois conduit à réévaluer les réglementations dans le but de renforcer la sécurité des équipages et d'allonger la durée de vie des navires. » Faute de modèles d'impact précis et solides sur lesquels s'appuyer, ces valeurs forfaitaires ont été revues à la hausse.

Ces valeurs ont-elles été surestimées ? Et si oui, à quel point ? « Aujourd'hui, nous cherchons à anticiper toutes les agressions qu'un navire est susceptible de subir et, à partir de ces connaissances, à réfléchir au meilleur compromis possible entre masse et robustesse dans les phases de conception pour améliorer sa tenue sur houle. » C'est également l'un des enjeux majeurs des organismes de certification, comme Bureau Veritas qui développe, depuis une vingtaine d'années, des méthodes de calcul probabilistes pour ajuster sa réglementation. Diminuer les marges de conception, et donc la masse globale du navire – par exemple en réduisant le volume des équipements –, permettrait d'en optimiser la propulsion. Ou, à propulsion égale, d'accueillir plus de personnels ou de matériels à bord.

UN ENSEMBLE D'ONDES D'AMPLITUDES ET DE FRÉQUENCES VARIABLES

Seulement voilà, la houle est un phénomène aléatoire, ou « stochastique », très difficile à modéliser. Les conditions de mer sont très changeantes d'un jour à l'autre mais aussi d'un instant à l'autre. Certaines vagues, fréquentes et de faible amplitude, auront un impact d'abord limité sur le navire mais finiront par fatiguer la structure. Tandis que d'autres, rares mais violentes, généreront des chocs, avec des pressions et efforts importants sur la coque et ses appendices, tels que l'ensemble du navire sera touché, mettant à mal sa tenue à la mer. Un phénomène pouvant conduire jusqu'à la fissure ou la rupture de certains éléments du navire.

Si l'état de mer est relativement constant en moyenne sur une échelle de quelques heures, un navire rencontre des états de mer très différents, dépendants des zones géographiques traversées et des conditions météorologiques sur place. Au total, on estime qu'un navire rencontrera, sur toute sa durée de vie, soit 30 à 40 ans, quelque 50 millions de vagues aux profils extrêmement variés. Des conditions de navigation impossibles à

reproduire en bassin ou par une série de calculs déterministes. Reste une solution : modéliser les effets de la houle en la représentant comme une variable aléatoire et s'appuyer sur des méthodes de calcul statistiques pour déterminer le comportement du navire. « Pour dire les choses autrement, il nous fallait combiner la réponse aléatoire du navire à chaque état de mer avec la probabilité de rencontrer chacun des états de mer. », résume Jean-Jacques Maisonneuve.

”

« Pour dire les choses autrement, il nous fallait combiner la réponse aléatoire du navire à chaque état de mer avec la probabilité de rencontrer chacun des états de mer »

Jean-Jacques Maisonneuve

UNE MONTÉE EN COMPÉTENCE SUR LA MODÉLISATION DES ÉTATS DE CHARGE

C'est sur ce constat qu'est né le projet APPHY*, soutenu par l'ANR (Agence nationale de la recherche). Pour ajuster au mieux les chargements hydrodynamiques aux besoins des navires, Jean-Jacques Maisonneuve et son collègue Jean-Charles Poirier ont décidé d'associer des données probabilistes à leurs modèles de calculs numériques CFD** 3D, précis mais très coûteux en temps de calcul. Les ingénieurs ont misé sur l'expertise reconnue dans cette discipline de l'ENSTA Bretagne, de l'Ifremer et de Bureau Veritas pour développer des méthodes analytiques probabilistes. Ces recherches ont d'abord permis de modéliser de multiples cas de chargements hydrodynamiques, rapidement et à moindre coût, via l'utilisation de modèles mathématiques poussés en conditions maîtrisées. Puis de générer des courbes de probabilités d'occurrences de ces chargements.

À partir de ces travaux, les ingénieurs de Sirehna ont pu identifier les événements les plus contraignants pour la structure selon les conditions d'opérabilité du navire, à savoir la vitesse, l'incidence par rapport à la houle et les conditions de houle. Cela leur a permis de concentrer la mise en œuvre des simulations CFD sur des zones d'intérêt. Une analyse lente et coûteuse qui a permis de calculer, en se fondant sur un découpage en millions d'éléments volumiques, les pressions et les efforts exercés par le fluide pendant ces événements extrêmes. Enfin, deux campagnes d'essais sur des cas d'impacts hydrodynamiques ont été réalisées par l'Ifremer dans ses bassins de Brest en juin 2020 et juin 2021, qui ont validé l'approche.



FAIRE ÉVOLUER LES RÉGLEMENTATIONS POUR ALLÉGER LA STRUCTURE

« Nous avons testé de nombreuses configurations d'angles d'impact et d'entrée dans l'eau, en partant d'un cas académique simple, un triangle, pour atteindre des configurations industrielles plus complexes, un profil d'aileron NACA et un "spray rail", cet appendice situé à l'avant des navires et chargé de casser la remontée d'eau. », s'enthousiasme Jean-Charles Poirier. Sans aboutir à ce jour à un outil pleinement opérationnel, le projet ANR a été l'occasion pour les équipes de Naval Group de monter en compétences sur la modélisation des impacts hydrodynamiques et de qualifier cette méthode par approche probabiliste/CFD combinée. « La houle est un ensemble d'ondes d'amplitudes et de fréquences variables, dépendant de paramètres extérieurs comme la distance à la terre ou le vent, qui est lui-même stochastique. », conclut Jean-Jacques Maisonneuve.

« Le développement de l'approche probabiliste, s'il était poursuivi ces prochaines années, nécessiterait la définition d'un seuil d'acceptabilité en termes de niveaux de contraintes et d'occurrences et une requalification des processus de conception. C'est ce dialogue que nous cherchons aujourd'hui à mettre en place en interne et avec les organismes de certification. » Par exemple avec Bureau Veritas, partenaire du projet. « L'approche probabiliste est un outil de recherche privilégié pour ajuster les données empiriques et faire évoluer les réglementations. », souligne Quentin Derbanne, responsable des recherches en hydrodynamique et structures au sein de Bureau Veritas Marine

Off-shore. Celle-ci permet d'obtenir des statistiques de réponses structurelles du navire pour s'assurer que le risque de plastification, de fissuration ou de flambement, qui sont trois modes de dégradation des structures, reste contenu à un niveau d'acceptabilité prédéfini. « Une approche probabiliste nécessite beaucoup de calculs et il est impossible de l'utiliser dans une boucle de conception. En revanche, elle peut servir à démontrer que les règles déterministes, établies sur un nombre plus restreint de cas, suffisent à garantir un dimensionnement acceptable, en maîtrisant mieux les marges de conception. »

L'OBJECTIF À TERME : PRÉVOIR LES NIVEAUX DE CONTRAINTES DANS L'ACIER

Pour Alan Tassin, chercheur à l'Ifremer, cette collaboration a été l'occasion de mieux appréhender les conditions réelles de conception des navires et l'applicabilité industrielle des travaux engagés en recherche fondamentale. Quant à Nicolas Jacques, de l'ENSTA Bretagne, il a pu développer des modèles analytiques qui dépassent les seuls résultats d'expériences et prennent en compte l'environnement marin et sa variabilité. Et le chercheur ne compte pas en rester là.

« Dans l'idéal, il faudrait disposer d'un outil capable de mesurer les risques de rupture des appendices de coque à partir des différents états de mer, confie Nicolas Jacques. Dans ce projet, nous nous sommes essentiellement intéressés aux chargements hydrodynamiques extrêmes – par exemple, la probabilité que l'aileron subisse un effort dépassant sa résistance ultime. Si nous appliquions ces développements à des cas plus courants, nous ne serions pas loin de pouvoir prévoir les niveaux de contraintes dans l'acier et par conséquent d'autres risques de défaillances de la structure et des équipements, comme la fatigue. » Pour un dimensionnement encore plus ajusté.

”

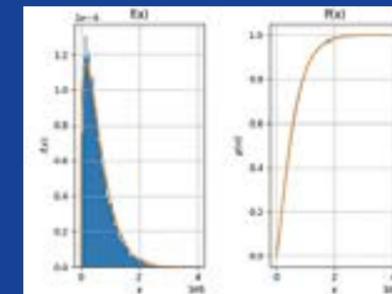
« L'approche probabiliste est un outil de recherche privilégié pour ajuster les données empiriques et faire évoluer les réglementations »

Quentin Derbanne, responsable des recherches en hydrodynamique et structures au sein de Bureau Veritas Marine Off-shore

LES MÉTHODES PROBABILISTES : INDISPENSABLES POUR MODÉLISER LA HOULE

Simuler toutes les conditions de mer est impossible : les profils de vagues se comptent par millions et tous n'ont pas la même probabilité d'occurrences. En revanche, lorsque l'on modélise la houle comme un processus stochastique gaussien – supposant que toutes les conditions peuvent être décrites avec des courbes gaussiennes qui précisent la répartition aléatoire des occurrences et des amplitudes des vagues –, il est possible d'obtenir des probabilités d'efforts d'impact, à partir de modèles d'impact analytiques fondés sur les équations de la mécanique des fluides (les équations de Navier-Stokes), modifiées selon des approximations qui les rendent calculables mais qui peuvent altérer la précision des résultats.

En pratique, ces modèles sont quasiment exacts sur des formes géométriques simples, en 2D ou à faible angle d'incidence. D'autres méthodes, comme les calculs CFD, permettent de traiter des problématiques plus variées, mais au prix de temps de calcul pouvant être importants. « Une méthode appliquée dans le cadre de ce projet fut d'utiliser un nombre restreint de calculs CFD pour élaborer un modèle mathématique simple, ou méta-modèle, des conditions d'impact, mais suffisamment robuste pour être intégré ensuite dans une approche probabiliste et statistique des chargements hydrodynamiques générés et de ses effets. », explique Jean-Charles Poirier.

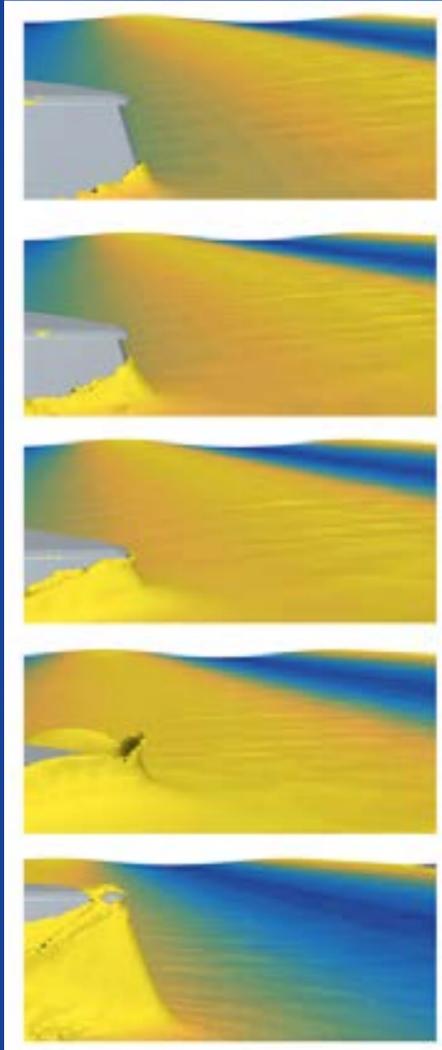


Exemple de modèle statistique

Cette figure présente la répartition « court terme » (pour un état de mer donné) des efforts d'impact sur un spray-rail. x représente l'effort (en Newton) et $f(x)$ la densité de probabilité de cette grandeur. $P(x)$ est la fonction de distribution correspondante : sa valeur pour l'effort x donne la probabilité que les efforts rencontrés à cet état de mer ne dépassent pas l'effort x , information importante pour dimensionner le spray-rail.

CFD ET ANALYTIQUE, UNE APPROCHE COMBINÉE POUR GAGNER EN EFFICACITÉ

Le modèle CFD, fondé sur un maillage serré du volume étudié en plusieurs millions de cellules qui font l'objet d'une description 3D ultrafine, ne connaît pas de limites géométriques. En revanche, il reste aujourd'hui très coûteux en temps et en puissance de calculs, malgré l'essor constant des calculateurs. Une seule simulation peut prendre entre une dizaine d'heures et quelques jours en méthode CFD, contre seulement quelques secondes ou minutes en approche analytique. Les experts du projet APPHY ont ainsi développé une approche combinée des deux méthodes, ce qui permet de générer rapidement des milliers de données et d'identifier les plus pertinentes – pour ensuite les implémenter dans un modèle CFD d'ensemble.



+ Exemple de simulation numérique CFD d'une étrave dans la houle

Ce calcul de l'impact de la houle sur l'étrave est fondé sur un modèle tridimensionnel ultrafin. Il permet de décrire en détail les phénomènes physiques et appelle des ressources informatiques conséquentes.



DEUX CAMPAGNES D'ESSAIS POUR VALIDER LE MODÈLE

Deux campagnes d'essais de trois semaines ont été menées sur un aileron à échelle réduite dans les bassins de houle du centre océanographique de Brest en juin 2020 et juin 2021. La première a été réalisée en eau calme et plate, à vitesse imposée et à différents angles d'incidence des vagues. La seconde a été menée avec un aileron fixe – à angle d'incidence des vagues imposé – mais dans des états de mer irréguliers. « Il s'agissait de valider, par l'expérience, les modèles hydrodynamiques analytiques et numériques développés par nos partenaires. », explique Alan Tassin. Le plus complexe a été de modéliser ce que l'on appelle les « événements de séparation », lorsque des cavités d'air se forment sur l'aileron qui rentre dans l'eau. Soit sur le bord d'attaque – la partie arrondie située à l'avant –, soit au niveau du bord de fuite – à l'arrière, sur la partie saillante. « Ces travaux ont constitué un véritable challenge mais ont fait avancer nos connaissances. Nous n'avions jamais travaillé sur un corps asymétrique, comme la géométrie demandée par Naval Group. »



+ Les deux campagnes d'essais réalisés à Ifremer sur l'impact aileron d'une vague régulière ont permis de produire des données utiles à la validation des modèles hydrodynamiques.

BIBLIOGRAPHIE

- R. Hascoët *et al.*, "Effect of forward speed on the level-crossing distribution of kinematic variables in multidirectional ocean waves", *Ocean Engineering*, 2021.
- R. Hascoët *et al.*, "A two-dimensional analytical model of vertical water entry for asymmetric bodies with flow separation", *Applied Ocean Research*, 2019.
- R. Hascoët *et al.*, *A fictitious body continuation model for the vertical water entry of 2D asymmetric bodies with flow separation*, 34th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies (IWWWFB), 2019.
- R. Hascoët *et al.*, *An analytical model of vertical water entry for 2D asymmetric bodies with flow separation*, 24^e Congrès Français de Mécanique (CFM), 2019.

05

INTERACTIONS ONDES/MATIÈRE



”

« L'originalité de Naval Group est d'envisager la vibro-acoustique à moyennes fréquences sur des géométries réalistes, complexes, de bâtiments grâce à une approche inédite »

Valentin Meyer

DES MODÉLISATIONS VIBRO-ACOUSTIQUES AU PLUS PRÈS DE LA STRUCTURE RÉELLE DES NAVIRES

Pour obtenir une simulation fine des bruits engendrés par différentes sources de bruit et vibrations, externes ou internes, il est nécessaire de tenir compte de la structure effective, complexe, d'un navire. C'est l'enjeu des recherches de Naval Group dans ses travaux de modélisation vibro-acoustique, menés en collaboration avec le laboratoire Vibrations Acoustique de l'INSA Lyon, et qui ont permis des avancées majeures dans la gamme dite des « moyennes fréquences ».

Les sous-marins doivent réduire au maximum les bruits qu'ils émettent, notamment ceux engendrés par des vibrations – par exemple dues à des sollicitations internes au navire, comme les moteurs. Pour optimiser les performances vibro-acoustiques sur des gammes étendues de fréquences et identifier dès que possible d'éventuelles sources de bruit, les ingénieurs de Naval Group modélisent, dès la phase de conception, les phénomènes physiques en jeu. Avec une originalité : des avancées majeures dans la gamme des « moyennes fréquences », un domaine où aucun outil industriel satisfaisant n'existe encore.

RÉDUIRE LES BRUITS GÉNÉRÉS PAR DES VIBRATIONS : UNE NÉCESSITÉ

Les exigences liées à l'acoustique d'un sous-marin sont de trois natures. La première concerne la discrétion du navire vis-à-vis de sonars passifs qui écoutent la mer au moyen d'hydrophones : idéalement, pour rester indétectable, le sous-marin en fonctionnement ne doit pas émettre de signal acoustique supérieur à celui du bruit ambiant de la mer. La deuxième tient à sa furtivité face à un sonar actif, c'est-à-dire lorsque sa coque est soumise à une excitation acoustique provenant de l'extérieur. Cette performance est liée à sa capacité à minimiser les ondes renvoyées vers l'extérieur. La troisième exigence est liée aux performances de détection du sous-marin lui-même : il doit pouvoir utiliser son sonar passif sans être perturbé par le bruit de ses propres vibrations. En effet, les performances de l'antenne sonar installée sur la coque d'un sous-marin dépendent du rapport

signal sur bruit, qui est d'autant meilleur que le bruit est faible. Or, les sources de bruit les plus proches du sonar sont les excitations internes à la coque (bruit propre) et les turbulences générées par le déplacement du véhicule.

« Il est impératif qu'un sous-marin soit discret, aussi bien activement que passivement, dans toutes les bandes de fréquences. Il faut donc veiller à sa signature aux basses, moyennes et hautes fréquences, dès sa phase de conception. », résume Valentin Meyer, ingénieur en modélisation en vibro-acoustique au CEMIS* de Naval Research. Pour maîtriser la signature avant de le fabriquer, il faut donc disposer de simulations mathématiques et numériques de la coque du sous-marin et de son comportement acoustique, dans toute la gamme de fréquences, typiquement de quelques hertz à plusieurs dizaines de kilohertz.

LES TEMPS DE CALCUL, VERROU DES SIMULATIONS AUX MOYENNES FRÉQUENCES

Les simulations aux « hautes fréquences » – au-delà de quelques centaines de hertz – se fondent sur le calcul des énergies vibratoires et acoustiques entrant en jeu, sans besoin de considérer la géométrie exacte de la coque. Quant aux simulations « basses fréquences », en dessous de quelques hertz, elles utilisent des calculs numériques – avec la méthode des « éléments finis », dans lesquels la coque est modélisable par un maillage contenant un nombre raisonnable de mailles. La réponse vibro-acoustique du sous-marin peut alors être calculée à partir de ses fréquences propres de vibration, bien distinctes les unes des autres.

Mais aux « moyennes fréquences », de quelques dizaines à quelques centaines de hertz, une

simulation satisfaisante doit représenter des fréquences propres de vibration plus nombreuses et partiellement superposées, ce qui nécessite de mailler beaucoup plus finement la surface de la coque. Les vibrations locales de la coque sont notamment modifiées par la présence de structures internes comme les raidisseurs ou les cloisons et il est nécessaire d'en tenir compte pour modéliser les phénomènes physiques en jeu et obtenir des résultats précis. Les méthodes numériques ou analytiques habituellement utilisées s'avèrent inadaptées pour ces géométries complexes. Or, la résolution sur un maillage très fin d'une surface de milliers de mètres carrés demanderait des temps de calcul extrêmement importants.

LA CLÉ : LA DÉCOMPOSITION EN SOUS-SYSTÈMES

« L'originalité de Naval Group est d'envisager la vibro-acoustique à moyennes fréquences sur des géométries réalistes, complexes, de bâtiments grâce à une approche inédite, explique Valentin Meyer. Nos travaux, menés avec des chercheurs de l'INSA Lyon, considèrent le système physique qu'est la structure du sous-marin comme la somme de sous-systèmes. Le sous-marin est assimilé à une coque cylindrique couplée à l'eau environnante, ce qui permet une résolution analytique aux moyennes fréquences. Puis, on ajoute à cette coque différents éléments structurels que l'on peut traiter par éléments finis, de façon très précise, avant de les intégrer au calcul global. » Ce qui permet de tenir compte de façon réaliste de la présence et des emplacements de raidisseurs, de cloisons et de divers éléments internes du sous-marin susceptibles de participer à sa réponse vibro-acoustique.

« Nous avons étudié cette nouvelle approche avec Naval Group pour mettre au point des fonctions mathématiques – en l'occurrence des "fonctions de transfert condensées" ou Condensed Transfer Functions, CTF en anglais –, adaptées à chaque sous-système, explique Laurent Maxit, chercheur

en mécanique et vibro-acoustique au laboratoire LVA (Laboratoire Vibrations Acoustique) de l'INSA Lyon. Celles-ci permettent de caractériser le comportement vibratoire de chaque sous-système à leur interface avec la coque. Elles peuvent être calculées à partir d'un modèle propre à chaque sous-système. Par exemple, on peut utiliser un modèle analytique pour la coque en eau et un modèle d'éléments finis pour les structures internes à la coque. »

Une fois que les fonctions de transfert condensées ont été calculées pour les différents sous-systèmes, elles peuvent être assemblées pour prédire la réponse vibro-acoustique du sous-marin à différentes excitations – comme celles des turbulences de l'eau autour de lui, des bruits internes ou des ondes acoustiques d'un sonar actif. Les simulations fondées sur cette approche permettent ainsi de faire apparaître les irrégularités spatiales de la réponse vibro-acoustique aux différents points de la coque et de son environnement, en des temps de calcul compatibles avec une application industrielle, soit de l'ordre de quelques heures.

DES MODÉLISATIONS SANS CESSÉ AMÉLIORÉES

« Afin de perfectionner encore nos simulations, nous avons récemment affiné cette approche de "sous-structuration" de la géométrie du sous-marin pour tenir compte de la présence d'un revêtement acoustique sur la coque. », poursuit Valentin Meyer. Cette étude a fait l'objet de la thèse CIFRE de Florent Dumortier, toujours en collaboration avec le laboratoire LVA. Son objectif ? Tenir compte du fait que la surface d'une coque peut être revêtue d'isolants acoustiques qui minimisent le bruit rayonné par la coque (matériau de masquage) ou absorbent les ondes provenant d'un sonar actif (matériau anéchoïque). L'effet des différents matériaux de revêtement a déjà été beaucoup étudié, de même que les signatures vibro-acoustiques de coques cylindriques qui en seraient recouvertes. Mais ces travaux se heurtent à une réalité plus complexe : la coque n'est pas toujours intégralement revêtue. Or, si une coque est partiellement revêtue ou revêtue de différents types de matériaux, elle n'est plus « axisymétrique », si bien que les méthodes semi-analytiques généralement utilisées dans ce cas ne

s'appliquent plus. Il est pourtant indispensable de modéliser finement et d'obtenir des résultats en des temps de calcul raisonnables pour des configurations réelles, qui sont souvent différentes d'une simple coque cylindrique présentant une seule et même caractéristique vibro-acoustique sur l'intégralité de sa structure.

La thèse de Florent Dumortier, co-encadrée par Valentin Meyer et Laurent Maxit, s'est appuyée sur des résultats issus de la collaboration entre l'INSA Lyon et Naval Group sur la méthode CTF, pour développer une approche de modélisation vibro-acoustique différente (nommée « méthode des fonctions de transfert condensées inversée », reverse Condensed Transfer Functions, rCTF). Cette méthode modélise une coque partiellement revêtue en partant d'un modèle de coque intégralement revêtue à laquelle on retire une partie du revêtement, que l'on remplace par de l'eau. Cette démarche peut être intégrée à l'approche par sous-structuration et conduire, à terme, à des solutions de calcul précis, utilisables en ingénierie navale.

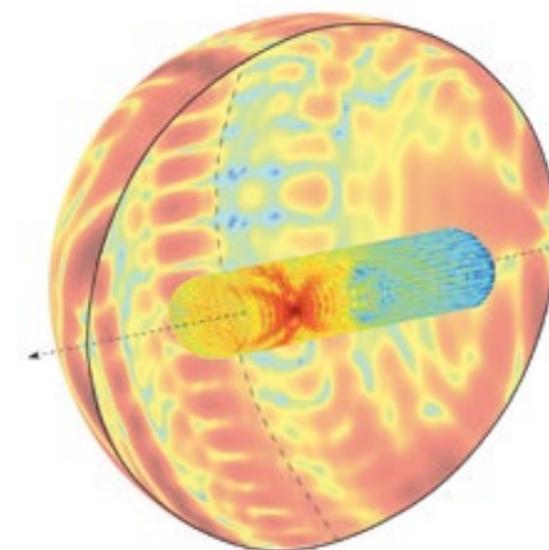
L'APPROCHE PAR SOUS-STRUCTURATION, UNE MÉTHODE DE CALCUL HYBRIDE RÉALISTE

L'approche par « sous-structuration » permet de décrire séparément les éléments de structure d'un sous-marin en apportant des solutions pour chacun d'entre eux, via la méthode de calcul la mieux adaptée à chaque élément (ainsi que schématisé sur la figure ci-dessous). Ceci permet de modéliser des structures complexes et d'obtenir une simulation de leur réponse vibro-acoustique, de façon rapide et précise.



Modélisation par sous-structuration

Dans de récents développements, la modélisation inclut la présence d'un revêtement acoustique partiel sur la coque.



Exemple de calcul vibro-acoustique

L'échelle de couleur est proportionnelle à l'intensité de la vibration résultant de l'excitation appliquée sur le sous-marin immergé. La simulation de la pression rayonnée par le cylindre – ici représentée sur une demi-sphère – tient compte de la présence de plusieurs dizaines de raidisseurs.

BIBLIOGRAPHIE

- L. Maxit et J.-M. Ginoux, "Prediction of the vibro-acoustic behavior of a submerged shell non periodically stiffened by internal frames", *Journal of the Acoustical Society of America*, 2010.
- V. Meyer *et al.*, "Prediction of the vibroacoustic behavior of a submerged shell with non-axisymmetric internal substructures by a condensed transfer function method", *Journal of Sound and Vibration*, 2016.
- F. Dumortier, *Principle of vibroacoustic subtractive modelling and application to the prediction of the acoustic radiation of partially coated submerged cylindrical shells*, Thèse de doctorat, 2021.

COMPRENDRE, PRÉDIRE ET LIMITER LE BRUIT D'ÉCOULEMENT AUTOUR D'UN SOUS-MARIN

Les ingénieurs de recherche de Naval Group ont récemment fait des avancées sur la modélisation et la simulation des bruits d'écoulement, en affinant les hypothèses des modèles et leur résolution mathématique. Le résultat de ces recherches, conduites en collaboration avec des experts en physique et en méthodes numériques ? Un outil de simulation, permettant de calculer les bruits provoqués par les turbulences de l'écoulement sur des géométries de complexité industrielle.

L'écoulement d'eau autour d'un sous-marin en mouvement conditionne ses performances hydrodynamiques (manœuvrabilité, tenue à la mer, etc.). Il peut aussi être à l'origine de bruits qui contribuent à la signature acoustique du navire et risquent par ailleurs de perturber ses systèmes d'écoute acoustique (sonar). Simuler les bruits d'écoulement afin d'en prévoir les conséquences et d'en minimiser les effets fait ainsi l'objet de recherches intensives à Naval Group. Des contributions récentes dans ce domaine ont été proposées par des experts du CEMIS*, grâce à des travaux de recherche réalisés en collaboration avec des équipes académiques spécialistes de mécanique des fluides et de méthodes mathématiques et numériques.

ÊTRE DISCRET MALGRÉ L'AVANCÉE DU SOUS-MARIN, UN DÉFI

Quand un écoulement est perturbé, les mouvements des particules du fluide s'organisent en tourbillons de différentes tailles et énergies – en mécanique des fluides, on parle de « turbulences ». Généralement invisibles à l'œil nu, ces tourbillons peuvent cependant avoir des effets acoustiques majeurs : ils peuvent être à l'origine de bruits importants lorsqu'ils font vibrer la plateforme des navires (coque, appendices, superstructures) et les pales du propulseur, ou encore se diffractent au voisinage des singularités géométriques des navires comme les hélices. « La signature acoustique des sous-marins, qui doit être, pour des raisons hautement stratégiques, aussi réduite que possible, est conditionnée par différents mécanismes. Nous étudions particulièrement les tourbillons engendrés par les mouvements du navire ou les pales d'hélice car ils sont la source principale des fluctuations de pression de l'eau. Or, ces fluctuations de pression sont à l'origine d'un bruit direct qui peut être amplifié par les singularités de coques, et d'un bruit indirect, généré par les vibrations de la coque ou encore du propulseur. », explique Gilles Serre, ingénieur modélisation en mécanique des fluides au CEMIS.

L'écoulement de l'eau autour du sous-marin ou de l'hélice crée en effet une « couche limite turbulente », au sein de laquelle la vitesse du fluide varie progressivement de la vitesse d'avance du

navire – ou de rotation des pales – à zéro (loin de ces structures). « L'épaisseur de la couche limite augmente entre le nez et l'arrière du sous-marin : pour une coque d'une centaine de mètres, elle peut atteindre plusieurs dizaines de centimètres dans la partie arrière, détaille Gilles Serre. Dans la couche limite se développent des tourbillons de durée de vie et de taille différentes, créant des excitations dont la fréquence s'étend ainsi sur une large bande, jusqu'à plusieurs dizaines de kHz. Les pales d'hélice, elles, ont une couche limite plus fine, de l'ordre du centimètre suivant les régimes de rotation, mais cela suffit à provoquer des variations de pression et donc du bruit. »

”

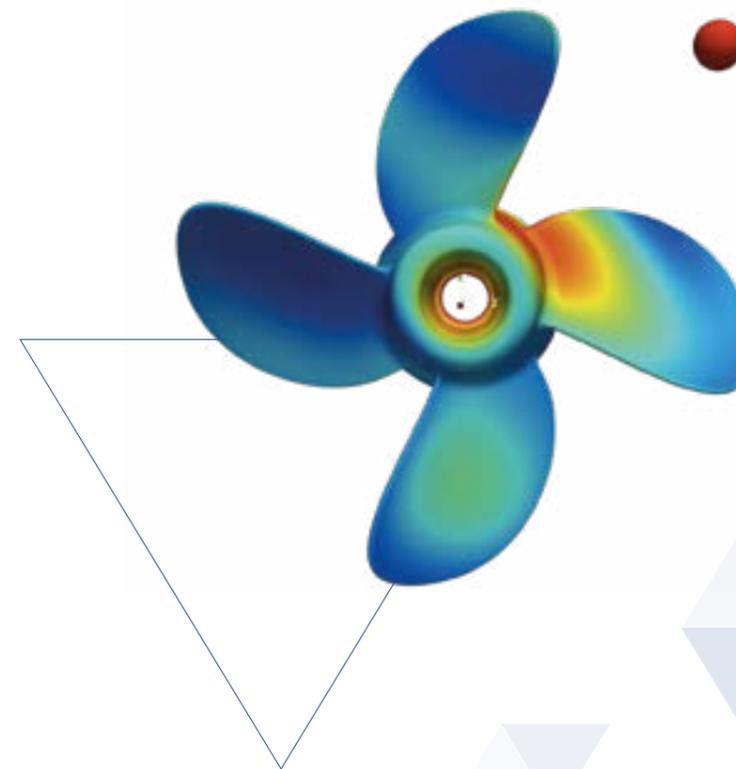
« Nous étudions particulièrement les tourbillons engendrés par les mouvements du navire ou les pales d'hélice car ils sont la source principale des fluctuations de pression de l'eau »

Gilles Serre

MODÉLISER ET CALCULER L'EFFET DES TURBULENCES

Déterminer les bruits engendrés par les turbulences nécessite tout d'abord de modéliser les processus physiques en jeu au sein des écoulements turbulents. L'objectif ? Décrire l'évolution dans le temps et l'espace des tourbillons, et la façon dont ils échangent de l'énergie avec les modes acoustiques. On obtient alors une représentation spatio-temporelle des sources d'excitation hydroacoustique et vibro-acoustique des structures (coque de sous-marin, pale d'hélice) en contact avec l'écoulement. Il s'agit ensuite de décrire comment ces sources vont « rayonner », c'est-à-dire comment les bruits engendrés par les écoulements et vibrations vont se propager dans le fluide. Pour les ingénieurs, l'enjeu est de modéliser ces phénomènes, très complexes, de la façon la plus exacte et la plus efficace possible. Il s'agit de les calculer numériquement avec un ordinateur, sans que les temps de calcul ne deviennent trop

longs, pour pouvoir envisager des applications industrielles. Les modèles mathématiques utilisés reposent sur l'« équation de Lighthill » : obtenue à partir des équations de la mécanique des fluides (les équations de Navier-Stokes), elle permet de décrire les sources à l'origine des fluctuations de pression, qui génèrent ensuite le bruit. Cette approche aide à formuler le problème de façon simple et à obtenir une relation permettant de calculer le niveau de bruit en une position, en fonction de la fréquence d'excitation et de son éloignement à la source. L'application de cette méthode, dite des « équations intégrales », à des structures navales (de formes complexes et immergées en eau) n'est pas sans poser de sérieux problèmes : la méthode demande en particulier de manipuler une fonction mathématique, une « fonction de Green » particulière, qui est difficile à construire pour des géométries complexes.



+ Exemple de calcul d'une fonction de Green par méthode intégrale

La fonction de Green permet d'identifier les sources de bruit responsables du rayonnement hydroacoustique d'une structure (ici une hélice), excitée par les tourbillons qui se trouvent dans l'écoulement tout autour. Son calcul est ici illustré par l'identification des contributions des vibrations de l'hélice à une mesure acoustique qui serait réalisée au point rouge, pour une fréquence donnée. Ce résultat est également une étape intermédiaire, nécessaire pour le calcul – à l'aide de l'équation de Lighthill – du rayonnement hydroacoustique provoqué par la diffraction des tourbillons en bord des pales.



INNOVER POUR DIMINUER LES TEMPS DE CALCUL

Le développement d'une méthode d'équation intégrale répondant aux spécificités des bruits d'écoulement a donc été accompli en collaboration avec plusieurs chercheurs de l'ENSTA Paris : Benjamin Cotté, maître de conférence au laboratoire d'applications industrielles IMSIA de l'unité Mécanique, spécialiste de la modélisation des sources vibratoires ; Jean-François Mercier, directeur de recherche au laboratoire PDEMS, commun avec l'Inria, qui s'intéresse aux propriétés mathématiques et numériques des fonctions de Green et de la méthode des équations intégrales ; ainsi que Stéphanie Chaillat, également chercheuse au laboratoire PDEMS. « Cette recherche commune avec Naval Group, réalisée dans le cadre de la thèse de Nicolas Trafny que nous avons encadrée avec Jean-François Mercier, posait différents problèmes académiques.

Il nous a fallu élaborer une modélisation adaptée aux géométries, spécifiques et complexes, des structures concernées, lesquelles sont totalement immergées en eau. Cette situation a été très peu étudiée, sur le plan acoustique, avec la méthode des équations intégrales. », commente Benjamin Cotté.

« Ces deux spécificités nous ont conduits à utiliser une formulation "analytique" des fonctions de Green et des équations intégrales, aussi longtemps que possible avant de passer à l'étape de résolution numérique du problème. Nous avons en particulier pour objectif de réduire les temps de calcul, un besoin majeur des industriels. Notre collègue Stéphanie Chaillat, spécialiste de la résolution numérique des équations intégrales, a beaucoup apporté à ces recherches. », souligne Jean-François Mercier.

VERS UN OUTIL DE CONCEPTION POUR LES INGÉNIEURS DE PRODUCTION

À l'issue des trois années de recherches conduites dans le cadre de la thèse de Nicolas Trafny (voir l'encadré), Naval Group dispose de nouveaux outils analytiques et numériques permettant de calculer un spectre d'intensité des bruits sur les gammes de fréquence d'intérêt, à partir des paramètres de la couche limite – lesquels peuvent être issus de mesures expérimentales ou de simulations. Une avancée majeure dans les modélisations et simulations qui permettra à terme d'optimiser la conception et les performances acoustiques des navires.

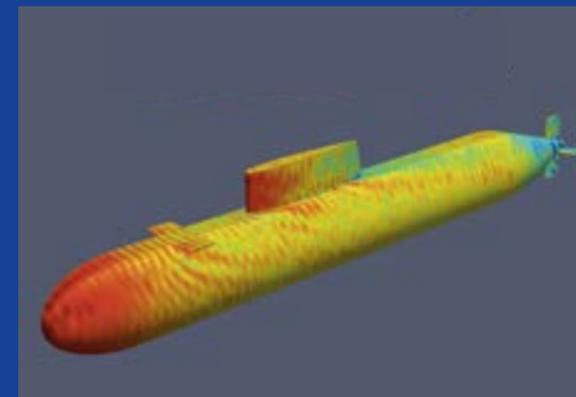
« La méthode développée nous permet de définir, en un temps de calcul très raisonnable, le "niveau de bruit", c'est-à-dire l'intensité de bruit maximale, et les zones ou éléments du sous-marin qui en

sont responsables, conclut Gilles Serre. Nous poursuivons nos travaux pour caractériser les directions dans lesquelles les bruits sont les plus intenses et, à terme, pour tenir également compte de paramètres plus fins, comme les gradients de température dans l'eau qui impactent fortement la propagation sous-marine des sons. Nos résultats actuels sont très encourageants et nous disposons désormais d'un outil interne qui va au-delà des outils commerciaux existants. Nous travaillons maintenant à améliorer ces outils informatiques afin de les rendre plus ergonomiques pour les ingénieurs de production de Naval Group, tout en continuant à les faire évoluer pour que les calculs puissent s'étendre à un plus grand nombre d'applications industrielles. »

UN MODÈLE PRÉDICTIF POUR LES GÉOMÉTRIES COMPLEXES

Les travaux de thèse de Nicolas Trafny ont permis des avancées notables dans l'estimation du bruit des hélices marines et des appendices de navire. Connaissance des enjeux industriels, modélisation des phénomènes physiques, mathématiques appliquées et développement numérique : les verrous à lever pour la simulation des bruits engendrés par les écoulements appelaient une approche multidisciplinaire.

Pendant trois ans, dont une année passée dans les laboratoires de l'ENSTA Paris, Nicolas Trafny s'est concentré sur des situations dans lesquelles tout sous-marin – même le plus discret – pourrait trahir sa présence par des bruits hydrodynamiques caractéristiques, à différentes fréquences sonores. « Lorsque la couche limite turbulente se développe le long de la surface du sous-marin et des pales de son hélice, il peut y avoir une amplification liée au phénomène de diffraction. Il se produit alors une conversion de l'énergie associée à la turbulence en ondes sonores. Or, cette conversion peut être très efficace, en particulier à proximité des singularités géométriques, précise Nicolas Trafny. J'ai donc développé une nouvelle approche basée sur une analogie acoustique, qui permet de prendre en compte un obstacle de forme complexe, tel qu'un sous-marin. Au-delà des méthodes existantes, limitées à des formes simples comme des sphères, des cylindres ou des plaques infinies, mon travail de thèse a permis de proposer un modèle prédictif lorsque la géométrie est complexe. » Nicolas Trafny a soutenu sa thèse en novembre 2021 et poursuit désormais ses recherches au CEMIS, dans l'équipe d'acoustique.



Les travaux de Nicolas Trafny ont permis de simuler les mécanismes responsables du bruit rayonné en fonction de la position de l'observateur : dans l'image ci-contre, les zones responsables de l'émission acoustique vue par un même observateur placé devant le sous-marin sont en rouge. L'image montre la zone de coque à l'origine de l'émission vibro-acoustique.

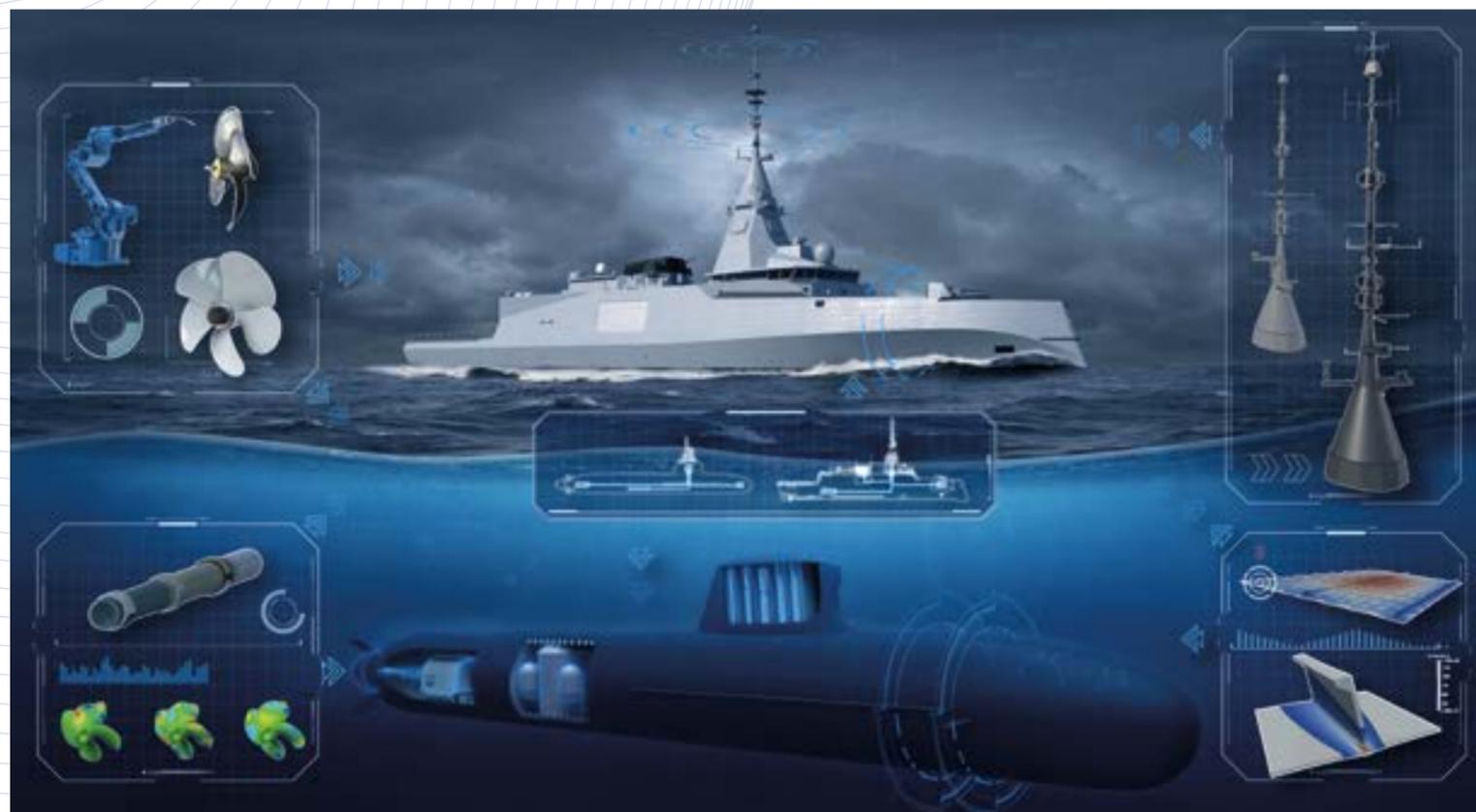
BIBLIOGRAPHIE

- S. Chaillat et al., "Efficient evaluation of three-dimensional Helmholtz Green's functions tailored to arbitrary rigid geometries for flow noise simulations", *Journal of Computational Physics*, 2022.
- N. Trafny, *Développement d'une approche semi-analytique pour la prédiction du bruit large-bande produit par l'interaction entre un écoulement turbulent et un obstacle rigide de forme complexe. Application au bruit des hélices marines et des appendices de navires, hors cavitation*, Thèse de doctorat, 2021.
- N. Trafny et al., "On the use of numerical Green's functions in acoustic analogies for edge noise prediction at low Mach number", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2021.
- N. Trafny et al., *An analytical approach based on tailored Green's functions for flow noise prediction at low Mach number*, *Forum Acousticum*, 2020.
- N. Trafny et al., *Impact of the Green function in acoustic analogies for flow noise predictions at low Mach number*, 2019.

* Le CEMIS (Centre d'Expertise de Maîtrise de l'Information et des Signatures) est une unité de recherche et développement de Naval Research.

06

MATÉRIAUX & STRUCTURES



L'HÉLICE EN COMPOSITE, UNE INNOVATION QUI FAIT SON CHEMIN

Pourquoi une hélice de sous-marin ou de bâtiment de surface devrait-elle forcément être métallique ? Depuis 2016, Naval Group étudie activement la piste des matériaux composites, qui ont notamment pour eux la légèreté et la résistance. L'objectif prioritaire est d'équiper des navires militaires. Mais la volonté de réduire les coûts ouvre la voie à des applications civiles.

Pour lancer des recherches sur les hélices en composite de navires militaires, il fallait au départ aller à l'encontre d'idées reçues. Par exemple, la peur de la casse, même si ces matériaux sont particulièrement résistants ou la conviction qu'une pièce aussi critique que l'hélice ne saurait se passer de la solidité rassurante du métal. Convaincu des atouts des composites (voir l'encadré), Naval Group a sauté le pas en 2015 avec le projet Hélico, financé intégralement sur fonds propres.



DEUX PME DE LA RÉGION OUEST ASSOCIÉES AU PROJET

« Hélico comprenait une thèse sur la modélisation du couplage fluide/structure, et une étude confiée à notre filiale Sirehna sur des outils de simulation et de calcul de la performance de l'hélice, raconte Frédérique Le Lay, expert en matériaux composites. Puis en 2016, nous avons signé un projet Rapid avec la direction générale de l'Armement pour concevoir, fabriquer et tester un démonstrateur, avec deux PME de la région Ouest. » Le projet Rapid porte sur des technologies dites « duales » : leurs débouchés sont à la fois civils et militaires.

Cette possible ouverture à de vastes marchés intéressait en particulier les deux PME, Méca (bureau d'études de la région nantaise) et Loiretech (constructeur de pièces industrielles complexes). Elle impliquait bien sûr des coûts de production et de maintenance

maîtrisés. Et du côté du naval de défense, il n'était pas question pour autant de dégrader les performances de l'hélice.

« Nous sommes partis de loin, explique Frédérique Le Lay. Les hélices en composite qui existaient à l'époque sur quelques navires civils étaient élaborées avec des procédés coûteux et présentaient des faiblesses sur la liaison, le bord d'attaque et le bord de fuite. En cas d'impact, elles pouvaient se délaminer, voire s'ouvrir. »

UNE PALE QUI SE DÉFORME SOUS LA PRESSION DE L'EAU

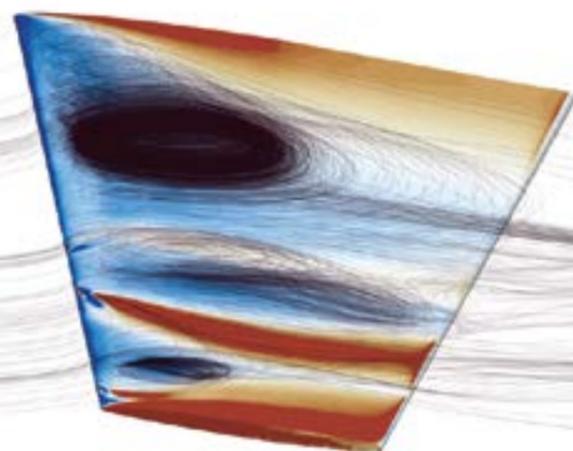
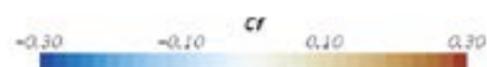
Dans un premier temps, les chercheurs se sont attachés à modéliser et simuler le fonctionnement de la future hélice. La thèse menée à l'École Centrale de Nantes visait en particulier à comprendre comment une pale composite se comporte en présence d'un écoulement liquide. Un problème particulièrement complexe. « La pale a une forme trapézoïdale et elle n'est pas plate, mais recourbée et partiellement vrillée, détaille Antoine Ducoin, enseignant-chercheur à l'École Centrale. La poussée de l'eau la déforme et l'écoulement génère des vibrations à haute fréquence. De plus, cet écoulement peut se décoller de la pale le long du bord de fuite, ce qui rend la propulsion moins efficace. »

La durée de la thèse ne permettait pas de modéliser tous ces phénomènes. Aussi, l'aspect vibratoire a été écarté au profit d'une évaluation précise de la déformation de la pale. Au passage, Laetitia Pernod, doctorante à Naval Group à qui ont été confiés ces travaux, a vérifié l'absence de risque de casse. « Ces résultats convergeaient avec les tests grandeur nature que nous avons menés à l'École Navale, reprend Antoine Ducoin. À cette occasion, nous avons instrumenté le composite en insérant des fibres optiques dans ses plis pour mesurer les déformations. Une première. »

QUAND LES DÉFORMATIONS DEVIENNENT VERTUEUSES

Les travaux de Sirehna, filiale de Naval Group, avaient une visée plus applicative : ils couplaient des codes de calcul sur les composites, l'hydrodynamique et la mécanique, pour déterminer la performance en propulsion de l'hélice. « C'est une pièce légère qui tourne à grande vitesse dans un fluide lourd, rappelle Pol Muller, responsable d'études chez Sirehna. Les pales peuvent se déformer de quelques pour cent, quand on parle de millièmes ou de dix millièmes pour des pales métalliques. » L'équipe a validé elle aussi l'absence de risque de casse. Elle s'est heurtée à des difficultés : comment modéliser fidèlement une pale composite constituée de 10 à 30 couches différentes et non homogènes ? Elle a vérifié un phénomène bien décrit dans la littérature : sur une pale bien pensée, les déformations sont vertueuses – c'est-à-dire bénéfiques pour la propulsion – à plusieurs régimes de fonctionnement. Alors que l'hélice métal, bien plus rigide, n'est prévue que pour un unique régime optimal.

« Nous avons réussi à développer une chaîne de calculs qui permet de simuler et de tester rapidement des dizaines de profils de pale, pour les besoins de la conception, précise Pol Muller. Je pouvais même définir une forme hydrodynamique idéale quand la pale est déformée, et l'outil en déduisait la forme qu'elle doit avoir au repos. »



+ Comment fixer solidement des pales en composite sur un moyeu métallique ? Réponse : avec un solide système en créneaux et huit boulons par pale.

FIXER DES PALES COMPOSITES SUR DU MÉTAL, UN DÉFI TECHNIQUE

Cette possibilité n'a pas été exploitée pour l'essai grandeur nature réalisé sur le bimoteur Le Palais : la pale en composite devait être identique à sa voisine en métal pour ne pas déséquilibrer le bateau. En revanche, l'accord sur cet essai conclu dès mars 2016 avec la compagnie Navix, propriétaire de la vedette, a dynamisé et accéléré le montage du projet Rapid, baptisé FabHéli. « Nous avons deux ans pour dimensionner et concevoir une hélice inédite – donc non décrite par un référentiel normatif –, choisir un procédé de fabrication, la produire et la soumettre à de multiples tests », résume Samuel Durand, du bureau d'études Méca. Heureusement, sa société et Loiretech avaient collaboré deux ans plus

tôt sur des pales d'hydrolienne en composite. Même si celles-ci tournent moins vite et ne servent pas à de la propulsion, elles avaient permis d'engranger de l'expérience.

Pour Méca, la principale difficulté de conception était le choix du mode de fixation des cinq pales sur le moyeu de l'arbre de transmission. « Les couples étaient des dizaines de fois supérieurs à ceux d'une hydrolienne. De plus, les pales démontables que nous avions retenues posent des problèmes de desserrage, de jeu et de fatigue. Après des études comparatives, nous avons opté pour un système de fixation en créneaux, avec huit boulons par pale. »

+ Calcul des interactions fluide/structure par « co-simulation »

La thèse de Laetitia Pernod a permis la mise au point d'une méthodologie de calcul adaptée aux profils portants déformables. Elle s'appuie sur deux outils numériques qui modélisent les caractéristiques de l'écoulement et l'état mécanique du profil en composites. Ce calcul couplé demande des réglages numériques subtils, pour rendre compte avec précision de la physique en jeu, et fournit des données de référence pour valider des approches simplifiées du couplage fluide/structure.

DES PALES À LA BONNE FORME, SANS USINAGE

La société Loiretech, dernier maillon du projet, devait fabriquer les cinq pales de l'hélice prototype destinée au Palais. Pour des raisons de coût, elle avait écarté les deux procédés les plus courants pour les composites : le préimprégné et l'infusion sous vide. Son choix s'est porté sur le Resin Transfer Molding (RTM), très utilisé dans l'automobile et l'aéronautique, qui permet de réaliser les pièces d'un seul tenant. Mais il a fallu procéder à d'importantes adaptations.

« Nos pales faisaient 40 mm d'épaisseur, contre 6 mm maximum pour les carrosseries de voitures, précise Franck Bourcier, directeur marketing et innovation de Loiretech. Par ailleurs, le RTM ne produit pas des formes parfaites : il faut usiner, ce qui laisse des fibres à nu et peut créer en milieu marin des entrées d'humidité par capillarité. Aussi, nous avons particulièrement soigné la conception de la préforme, la densité et la longueur des fibres de carbone, pour obtenir tout de suite les pales définitives. Elles ont été validées par Naval Group puis testées avec succès à Lorient. »



”

« Nous espérons notamment valider l'économie de carburant de 15 % et l'atténuation du bruit rayonné »

Franck Bourcier, directeur marketing et innovation de Loiretech

LES PALES EN COMPOSITE, UN SUJET TOUJOURS D'ACTUALITÉ

Pourquoi ce test n'a-t-il pas débouché plus vite sur l'équipement de navires de défense en hélices en composite ? Parce qu'un changement de matériau sur une pièce aussi critique demande beaucoup de temps, d'études, d'essais et de validations. L'aventure se poursuit. Depuis la fin de FabHéli en 2018, l'École Centrale de Nantes est montée en compétences sur l'instrumentation de composites par fibre optique. Elle a aussi amélioré sa modélisation des interactions fluide/structure, dans le cadre de plusieurs projets avec Naval Group. « Le sujet reste totalement d'actualité », estime Antoine Ducoin. Méca a également été associée à plusieurs de ces projets.

Sirehna dispose maintenant d'une chaîne de calculs pour accompagner les démarches de conception. Bureau Veritas, associé un moment à FabHéli, a posé les bases d'une approche de certification des hélices en composite. Enfin, Méca et Loiretech participent depuis la mi-2022 au projet européen Copropel, coordonné par une université grecque. Il porte sur le développement et le test d'hélices en composite plus grandes (jusqu'à 2 m de diamètre, contre 1,10 m pour FabHéli), sur des durées de plusieurs mois et sur différents navires civils, dont peut-être des porte-conteneurs. Des atouts qui faciliteraient également la conquête de premiers marchés en naval de défense.



UNE HÉLICE EN COMPOSITE, POUR QUOI FAIRE ?

- **Diviser par deux la masse de l'hélice** par rapport à son équivalent en métal.
- **Alléger l'ensemble du système propulsif et économiser jusqu'à 15 % de carburant** par rapport à une hélice métallique. Cet aspect n'a pas pu être validé dans le cadre des projets Hélico et FabHéli, mais le sera pendant le projet européen Copropel qui a débuté en juin 2022.
- **Réduire les coûts de fabrication**, dans le cadre d'une production en grande série qui permettrait d'amortir l'investissement initial de réalisation des moules.
- **Simplifier la maintenance** : il existe un réseau bien établi de réparation navale spécialisée dans le composite. Et avec les pales démontables, il suffit en cas d'avarie sévère de remplacer la pale défectueuse.
- **Atténuer la signature acoustique, magnétique et électrique** de l'hélice. Cet aspect intéresse les navires de défense (chasseurs de mines par exemple), les bâtiments d'exploration océanographique et les bateaux de pêche. Là encore, les gains escomptés doivent être validés par Copropel.

+

L'hélice composite fabriquée par Loiretech testée sur un navire à passagers.

BIBLIOGRAPHIE

- L. Pernod, *Simulations couplées fluide-structure et étude expérimentale d'un hydrofoil composite sous écoulement hydrodynamique*, Thèse de doctorat, 2019.
- P. Muller et F. Pécot, *Development of a fluid structure coupling for composite tidal turbines and marine propellers*, VII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, 2017.
- L. Pernod et al., *Coupled numerical simulation of an aluminum and a composite hydrofoil in steady and unsteady flows*, Fifth International Symposium on Marine Propulsors, 2017.

COMMENT CONCEVOIR DES NAVIRES DE DÉFENSE PLUS « VERTS » ?

Même s'ils ne sont pas concernés par la réglementation des flottes civiles, les navires de défense doivent aujourd'hui générer moins de déchets, consommer moins d'énergie, impacter le moins possible les biotopes marins et devenir plus faciles à recycler en fin de vie. L'écoconception est devenue un objectif stratégique de Naval Group et inspire de multiples travaux de recherche.

La décision est passée inaperçue, mais en dit long sur la montée des exigences environnementales en mer. Fin 2021, les pays limitrophes de la Méditerranée sont convenus d'en faire une zone ECA (Emission Control Area) à partir de 2025. De Gibraltar à l'entrée du canal de Suez, les navires civils devront utiliser un fioul lourd à très faible teneur en soufre (0,1 %, contre 0,5 % auparavant). Objectif : faire chuter les émissions de polluants et de particules fines.

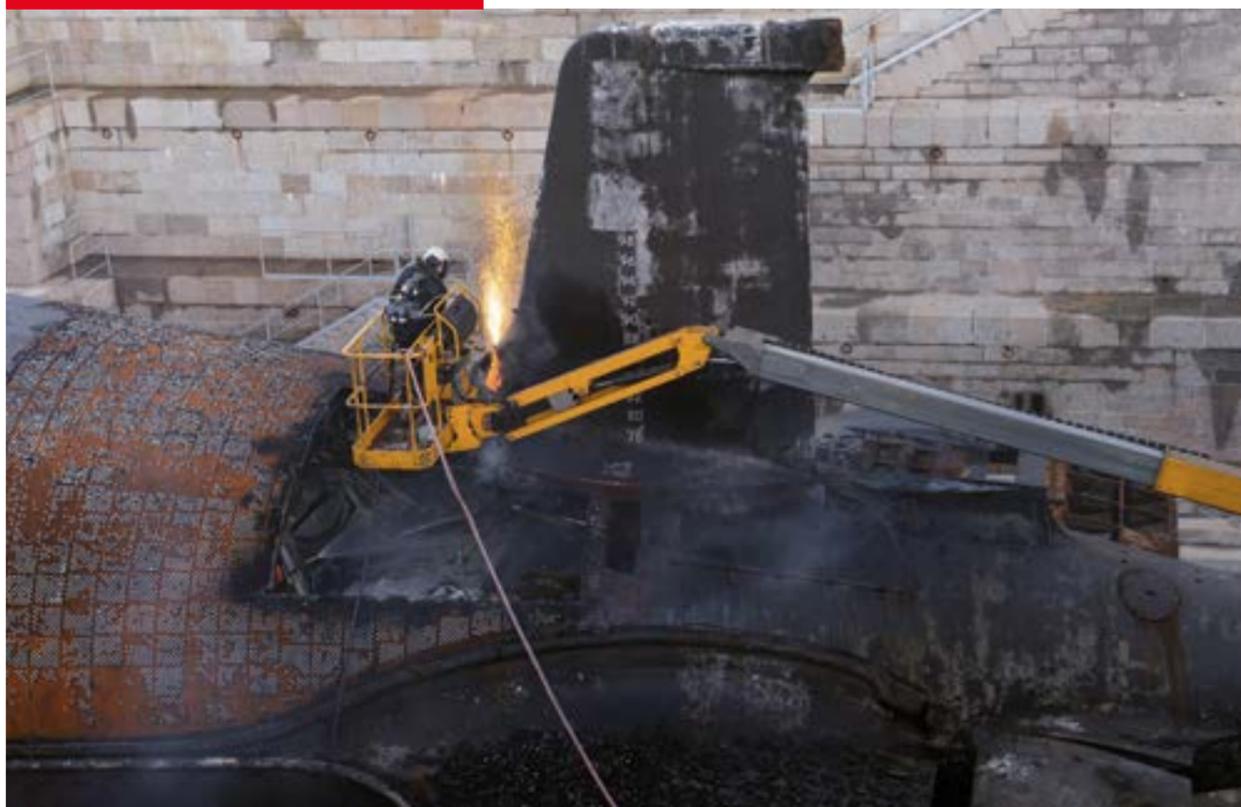
RÉGLEMENTATIONS INTERNATIONALES, CAHIERS DES CHARGES CLIENTS : LA PRESSION S'ACCENTUE

Avant la Méditerranée, des zones ECA avaient été créées en mer Baltique et en mer du Nord, dans une partie des Caraïbes et le long des côtes américaines et canadiennes. Mais la Méditerranée, avec ses 2,5 millions de km², marque un changement d'échelle. « Et cela s'inscrit dans une tendance plus large, complète Gaëlle Rousseau, responsable Écoconception de Naval Group. La réglementation maritime internationale fixe des standards de plus en plus sévères pour les peintures de coque, les déchets et rejets des navires, leur recyclage en fin de vie, etc. » En théorie, cette réglementation ne s'applique pas au naval de défense. Mais difficile de l'ignorer ou de considérer que cette exception persistera. D'autant que la direction générale de l'Armement et de nombreux clients étrangers de Naval Group glissent à leur tour dans leurs cahiers des charges des exigences environnementales. Ce qui implique une vaste réflexion, en amont de la construction des navires.

”

« Avec plus de 50 études par an sur le sujet, nos activités de recherche intègrent une composante environnementale »

Joëlle Gutierrez



50 À 70 ÉTUDES PAR AN À COMPOSANTE ENVIRONNEMENTALE

« Nous ne découvrons pas ces sujets, précise Joëlle Gutierrez, directrice technique du domaine Environnement et Écoconception. Depuis plusieurs années, 20 % de nos activités de recherche ont une composante environnementale, soit 50 à 70 études par an. Nous travaillons dans différents domaines pour réduire les impacts de nos navires : gestion des déchets, allègement des structures, évaluation de matériaux biosourcés et de solutions plus vertes pour lutter contre le fouling* ou la corrosion, etc. Mais nous engageons de façon très volontariste dans l'écoconception, comme Naval Group l'a décidé fin 2021, revient à passer au stade supérieur. »

L'écoconception implique en effet de chiffrer l'ensemble des impacts environnementaux d'un navire, de sa construction à son démantèlement, pour pouvoir comparer différentes options de matériaux, de techniques d'assemblage, de motorisations, etc., afin de déterminer laquelle sera la plus « verte ».

PRIORITÉ N°1 : L'EMPREINTE CARBONE DES NAVIRES

« Quantifier ces impacts est un sujet de recherche à part entière, annonce Gaëlle Rousseau. La chaîne consommation de gazole-production de gaz à effet de serre-réchauffement climatique est au cœur de nos préoccupations. Aussi, nous souhaitons développer une modélisation pérenne et partagée de la mesure des empreintes carbone, transposable à nos navires. Nous avons réalisé trois mesures en interne, mais elles ne sont pas comparables à celles des flottes civiles, avec leurs trajets réguliers : nos missions sont par nature imprévisibles et fortement variables. »

Naval Group a donc lancé un projet collaboratif de deux ans sur la modélisation de l'empreinte carbone avec l'Institut Arts et Métiers de Chambéry et l'École nationale supérieure maritime (ENSM), qui travaille notamment sur la transition et l'optimisation énergétique des navires. « Nous voulons établir des profils types de consommation et d'usage, explique Dominique Follut, son directeur de la recherche. La difficulté est de savoir où mettre le curseur. On ne peut pas appliquer le même profil à un patrouilleur côtier et à un porte-avions. On ne peut pas non plus faire des profils individuels, ce qui s'avérerait trop complexe à modéliser. L'idéal serait d'arriver à de grandes familles de profils, assez génériques pour que plusieurs navires s'y retrouvent et assez précises pour que chacun puisse être optimisé. »

+

Rendre un navire en fin de vie facile à démanteler, pour récupérer des pièces faciles à recycler, implique des choix de conception qui anticipent ce scénario. Mais qui doivent être faits plusieurs dizaines d'années plus tôt...

CONCILIER L'ECOCONCEPTION ET LES CONTRAINTES MILITAIRES

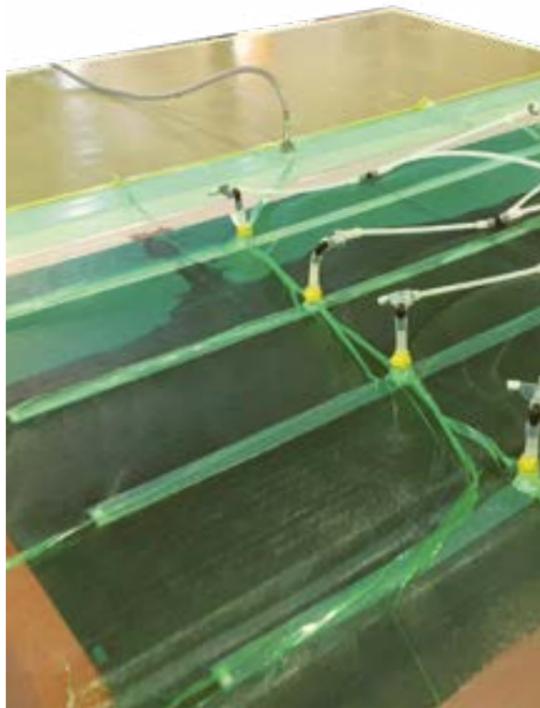
Que pourra-t-on optimiser, justement ? La propulsion, bien sûr, avec une possible ouverture vers l'un des nouveaux carburants que l'ENSM étudie par ailleurs : hydrogène, bioéthanol, biogaz, ammoniac... Mais aussi d'autres aspects, comme les choix de matériaux ou la facilité de déconstruction du navire en fin de vie, pour en récupérer et en réemployer des éléments. Dominique Fallut insiste toutefois sur une contrainte : « Nous parlons de naval de défense. Les critères d'écoconception ne doivent pas pénaliser la performance opérationnelle et la capacité à mener des missions dans le monde entier. Il faut exclure le carburant vertueux mais introuvable dans la plupart des ports, ou le système écologique trop complexe à réparer. L'approche scientifique doit être combinée à une bonne dose de réalisme. »

Les modélisations d'empreinte carbone ont une autre vertu : elles alimentent les analyses de cycle de vie (ACV). Outre les gaz à effet de serre, celles-ci prennent en compte l'ensemble des impacts environnementaux : consommation de matières premières, transport, rejets polluants dans l'eau et dans l'air, déchets générés, etc.

MATÉRIAUX COMPOSITES : AU MOINS DEUX FOIS PLUS LÉGERS QUE L'ACIER...

Ces approches à l'échelle du navire complet vont de pair avec des recherches plus ciblées. Par exemple, celles sur les matériaux composites, pressentis pour remplacer les aciers et alliages métalliques sur certains éléments comme les superstructures de bâtiments de surface. « Ils sont deux fois plus légers pour une résistance équivalente, justifie Émilien Billaudeau, ingénieur en matériaux composites. Et si la masse des navires diminue, leur consommation et leurs rejets baisseront. On peut même envisager de réduire la taille des systèmes de propulsion. »

Naval Group intègre des composites dans ses navires depuis 60 ans, par exemple dans les ponts et passerelles de sous-marins. Toutefois, d'importants verrous techniques en matière d'assemblage et de tenue au feu freinaient jusqu'ici leur utilisation dans les structures de grandes dimensions de bâtiments de surface. Or, ces verrous sont en passe d'être levés, comme l'a montré en particulier le projet européen RAMSSES entre 2017 et 2021. Naval Group a notamment participé à la validation de superstructures acier/composite dont la résistance mécanique, la tenue au feu, les interfaces multi-matériaux et la durabilité ont été caractérisées.



+ Fabrication d'un matériau composite innovant pour superstructures de navire par procédé d'infusion, dans le cadre du projet européen RAMSSES auquel Naval Group a participé de 2017 à 2021.

»
« Nous souhaitons développer une modélisation pérenne et partagée de la mesure des empreintes carbone, transposable à nos navires »
Gaëlle Rousseau

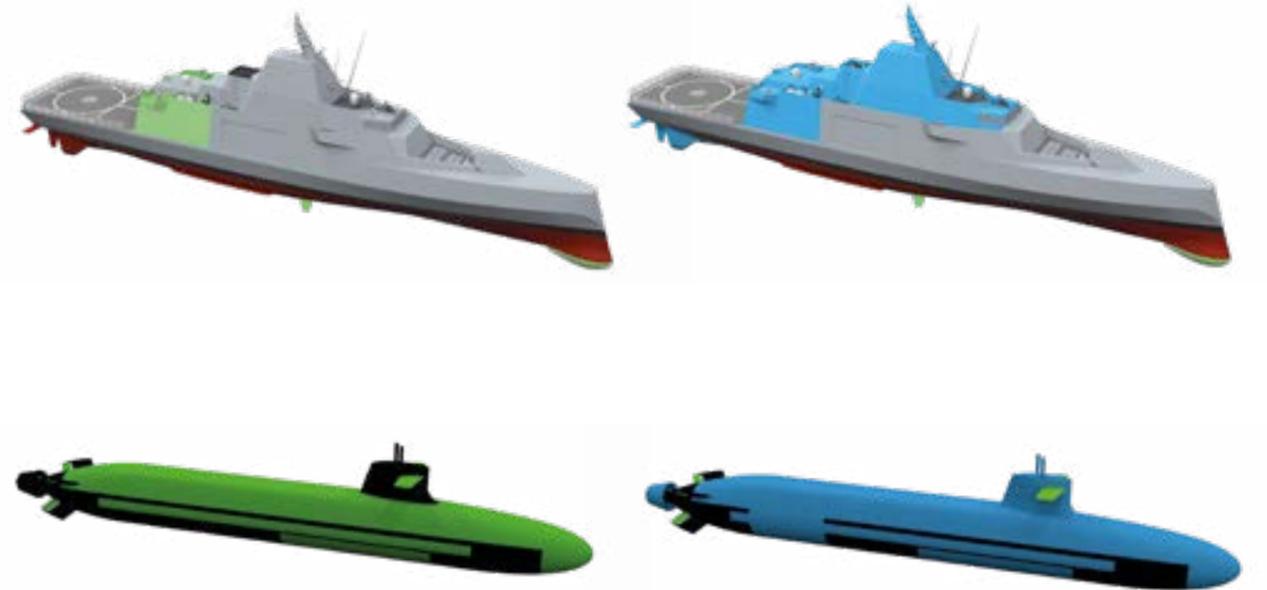
... MAIS LE GAIN DE MASSE N'EST PAS LE SEUL CRITÈRE PERTINENT

« Nos navires incorporeront de plus en plus de composites et nous avons décidé d'établir une feuille de route pour ces matériaux, confirme Gaëlle Rousseau. Comme le gain de masse n'est pas le seul critère pertinent, nous réalisons des ACV afin de connaître et de comparer leurs impacts respectifs sur l'environnement. » Sur la vingtaine de références de composites employées par Naval Group, seules les plus utilisées feront l'objet de ces ACV. « Nous nous focalisons notamment sur leurs procédés de fabrication, plus ou moins gourmands en énergie, et sur le fait qu'ils sont biosourcés ou non. », détaille Robin Sauter, responsable Environnement en conception. Certains incorporent en effet des fibres de lin, du bambou ou du basalte, ce qui est un bon point. Mais ces éléments sont toujours associés à une

résine issue de la chimie du pétrole : le recyclage en fin de vie n'est pas évident.

Quant au choix du procédé, il est dicté par les contraintes d'environnement et d'architecture mais également par les sollicitations que subit la pièce et par sa criticité : « Un mât de sous-marin, par exemple, supporte à la fois la force de traînée hydrodynamique et les paquets de mer, explique Émilien Billaudeau. Il est conçu avec un niveau de performance très élevé, ce qui nécessitera l'usage de composites constitués de fibres de carbone si nous passons demain au mât en composite. » Tout faire pour l'environnement, mais ne rien sacrifier à la performance du navire : c'est la délicate équation posée par le virage vers l'écoconception.

+ Encore peu présents sur les navires actuels, les composites devraient remplacer le métal dans de nombreuses structures des futurs sous-marins et bâtiments de surface.



■ Structures composites présentes à bord

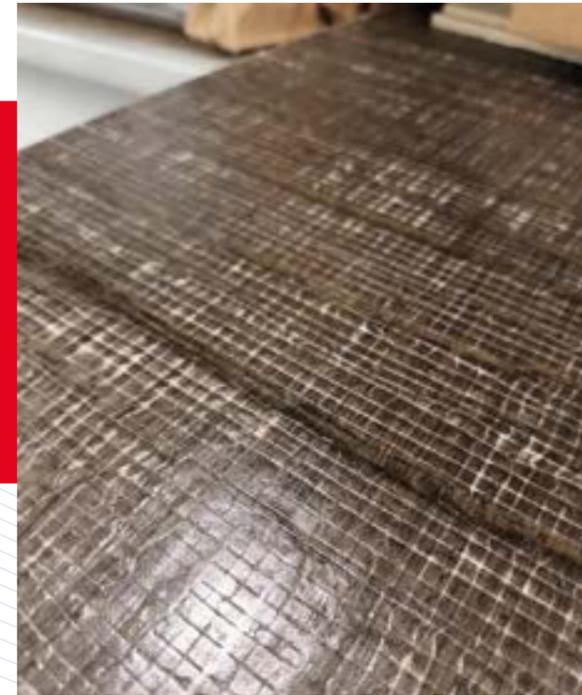
■ Structures composites en développement

*Accumulation de micro-organismes marins sur les coques de navire.

UNE ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DE CHAQUE NAVIRE D'ICI 2023

Les analyses de cycle de vie (ACV) sont une donnée d'entrée pour les analyses environnementales ; ces dernières ont pour but de lister la totalité des impacts environnementaux d'un navire, y compris en cas de défaillance. « Il peut s'agir par exemple d'une fuite d'huile à bord ou d'une perforation du réservoir de gasoil, decode Robin Sauter. Nous estimons la probabilité de tels événements, leur gravité et leur étendue potentielle, pour parvenir à une note globale. »

Fin 2023, la plupart des navires construits par Naval Group ou en cours de conception auront fait l'objet d'une analyse environnementale, ce qui implique une forte mobilisation interne. « Nous voulons à la fois sensibiliser nos collègues et inciter certains de nos clients à anticiper, à viser des performances qui vont au-delà des réglementations en vigueur. », explique Gaëlle Rousseau.



+ Ce composite à base de fibres de lin est produit par Naval Group à Lorient.



+ Les peintures des navires, qui les protègent de la corrosion et du fouling, sont en permanence au contact du milieu marin. C'est pourquoi Naval Group étudie de nouvelles formulations plus « vertes ».

NAVAL GROUP



DIRECTION DE LA COMMUNICATION

40-42, rue du Docteur Finlay
75732 Paris Cedex 15

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Vincent GEIGER

RÉDACTEUR EN CHEF

Pierre DALLOT

COMITÉ DE RÉDACTION

Christophe BAIXAS
Marc BOISSET
Thierry BOUCHET
Pierre DALLOT
Camille GAUTIER
Vincent GEIGER
Cédric LEBLOND
Jean-Jacques MAISONNEUVE
Valentin MEYER
Jean-François SIGRIST
Jean-Michel TRAN

RÉDACTION

Catherine DESCOMBES-JOULAIN
Séverine LEMAIRE-DUPARCQ
Gilles MARCHAND
Véronique PARASOTE
Benoit PLAYOUST
Jean-François SIGRIST

COORDINATION DE LA RÉDACTION, CONCEPTION GRAPHIQUE ET RÉALISATION

Innovascio