

Formations et recherche en ingénierie maritime, besoins et perspectives

Entretien avec Yann Doutreleau,
Directeur de la recherche d'ENSTA Bretagne

Les formations et la recherche couvrent des domaines étendus et complémentaires. Elles créent et diffusent des connaissances et compétences nouvelles pour le développement d'une économie bleue durable. Améliorer les performances technologiques et la durabilité des systèmes et capteurs, économiser les ressources et réduire les impacts environnementaux impulsent ces programmes.

Quels sont les domaines d'expertise d'ENSTA Bretagne en ingénierie maritime, notamment en formation ?

ENSTA Bretagne est une école d'ingénieurs dont l'objectif est de former des cadres supérieurs ayant à la fois une culture scientifique et technique multidisciplinaire et des compétences approfondies et opérationnelles dans des domaines de spécialité précis. L'école offre ainsi à ses étudiants un large spectre de possibilités allant de la conception avancée des structures mécaniques à la modélisation des architectures numériques en passant par les systèmes pyrotechniques, l'architecture des plateformes navales et de production d'énergies en mer, les systèmes de capteurs et de traitement de données notamment par l'intelligence artificielle, la robotique, etc. Nos équipes de formation et recherche sont constituées de mécaniciens, de spécialistes des matériaux, d'hydrodynamiciens, de mathématiciens, de signalistes, d'acousticiens, d'hydrographes, d'océanographes... qui constituent un panel complet de formateurs. Certaines spécialités sont dédiées au maritime, telles que l'architecture navale, les énergies marines renouvelables, l'hydrographie ou l'océanographie. D'autres,



comme celles qui concernent les systèmes de capteurs et leur traitement ou la robotique, ont des applications dédiées à la connaissance et à la création de systèmes d'exploration du milieu marin et sous-marin.

En tout, l'école accueille chaque année environ 1 000 étudiants en formations d'ingénieurs, masters, mastères spécialisés et thèses. La moitié d'entre eux acquièrent des compétences spécifiques au secteur maritime ou très orientées vers les applications navales. Cela fait d'ENSTA Bretagne l'école d'ingénieurs leader en technologies maritimes, par la diversité des spécialités couvertes et le nombre de diplômés. Sur 300 diplômés par an, ce sont 150 nouveaux experts et ingénieurs «de la mer» qui rejoignent chaque année les industries maritimes civiles et de défense.

En ce qui concerne la recherche, le maritime représente entre 30 et 70% des activités réalisées. Elles sont conduites en interaction forte avec les entreprises industrielles et le secteur de la défense.

Quelles sont les activités de recherche en sciences mécaniques ? Et peut-on parler d'ingénierie maritime «éco-responsable» sur ces sujets ?

Quelles sont les activités de recherche en sciences mécaniques ? Et peut-on parler d'ingénierie maritime «éco-responsable» sur ces sujets ? La recherche en mécanique à l'ENSTA Bretagne se déploie au sein de l'Institut de Recherche Dupuy de Lome (IRDL). Ce laboratoire constitue une UMR¹ -CNRS commune avec l'Université de Bretagne Sud (UBS), l'Université de Bretagne Occidentale (UBO) et l'École nationale d'Ingénieurs de Brest (ENIB).

Composé de 300 membres et doctorants, il vise à résoudre des défis scientifiques et technologiques liés à l'ingénierie des matériaux et des structures majoritairement en lien avec les applications marines. Pour cela, les chercheurs du laboratoire, et en particulier ceux de l'ENSTA Bretagne, lient démarches expérimentales, modélisations et simulations afin de fournir aux partenaires industriels des outils et des méthodes leur permettant une meilleure efficacité dans leurs approches de conception et de dimensionnement mécanique des systèmes.

Tous ces progrès permettent de gagner en performance, de favoriser la conception de navires plus verts ou d'améliorer les systèmes de production d'énergies marines renouvelables.

Pour illustrer, je citerais l'exemple de la création de la chaire industrielle ANR SelfHeating, financée conjointement par l'ANR, Safran et Naval Group et impulsée par ENSTA Bretagne. Obtenue en 2020 pour une durée de 4 ans, cette chaire vise à raffermir des méthodes de caractérisation rapide des propriétés en fatigue des matériaux et structures par mesures d'auto-échauf-

1. UMR : unité mixte de recherche. UMR désigne des laboratoires formés par l'association d'équipes de recherche de différents établissements et du CNRS.

fement. Pour ensuite les transférer aux entreprises partenaires. L'objectif est de diminuer par cent la durée d'analyse et les coûts par rapport à des approches classiques.

Ces travaux s'appuient sur ceux de la plateforme technologique MASMECA, qui réunit de nombreux moyens expérimentaux pour vérifier le comportement décrit par les codes de calculs de modélisation, qu'il s'agisse de comportements mécaniques, statiques ou dynamiques. Ces essais de validation sont conduits à toutes les échelles, dans tous types de conditions environnementales et pour toutes les conditions de contraintes subies en service.

Et comment contribuer à un transport maritime plus vert ?

Plusieurs leviers sont possibles, comme le choix des routes maritimes, le gabarit des navires, l'énergie de propulsion, les infrastructures portuaires développées, etc.

Chaque année, environ 70 de nos étudiants sont diplômés en architecture navale. Ce sont des hydrodynamiciens (qui étudient la résistance à l'avancement, la propulsion, la stabilité et la tenue en mer...), des concepteurs de structures navales, des ingénieurs R&D sur les structures et matériaux de demain (comportement et durabilité en mer) et des « ship designers » pour la conception de voiliers (en partenariat avec l'École d'architecture de Paris La Villette).

Comme le rappelle souvent l'équipe enseignante, « *la recherche d'un trafic maritime plus éco-responsable concerne forcément tous nos jeunes diplômés. Notre mission est de les y préparer.* » Face à l'évolution des législations sur les rejets de CO₂, la quête d'un trafic plus durable est un enjeu clé de nombreux programmes d'innovation.

Dans ces domaines, nos recherches portent sur les nouveaux modes de propulsion associant énergies fossiles et véliques. Nos chercheurs constituent ainsi l'équipe académique de référence pour la mise au point des voiles rigides qui équiperont les futurs paquebots de croisière français.

Cette équipe est également très impliquée dans les programmes de développement des « foils », qui limitent les besoins en énergie et les rejets en CO₂. Elle met au point les outils de conception et de dimensionnement de ces foils afin d'équiper un navire à moteur avec le bon type de foil et d'obtenir les performances d'hydrodynamisme attendues.

Outre leur utilisation pour les bateaux de compétition comme les IMOCA, ces ailes sous-marines intéressent plus largement les architectes navals et les industriels pour la mise au point de bateaux à moteur plus économes en énergie. Depuis 2020, des chercheurs en hydrodynamique d'ENSTA Bretagne (laboratoire IRDL) se sont associés à l'Ifremer et à l'IRENav pour conduire le projet OPTIFOIL, financé par les instituts Carnot Arts et Mer. Il s'agit de dé-



velopper des modèles numériques capables d'évaluer la performance de n'importe quel type de foil. Certains phénomènes physiques (ventilation, cavitation) qui apparaissent à l'interface air-eau ou la réponse non-linéaire de la structure d'un foil sous un chargement hydrodynamique, peuvent influencer sur son efficacité. L'intégration de ces paramètres dans des modèles constituent un enjeu scientifique fort.

Autre exemple très différent par le type de navires concernés (plus grands) et les disciplines de recherche mises en œuvre (mécanique des matériaux et des assemblages) : le projet européen RAMSSES².

De 2017 à 2022, le consortium RAMSSES, formé de 36 partenaires de 12 pays, a mené des recherches pour faire évoluer certains aspects d'architecture des grands navires civils et militaires afin d'améliorer leur durée de vie tout en réduisant leur empreinte environnementale. Deux des 13 axes de recherche étaient portés par ENSTA Bretagne et Naval Group et concernaient l'utilisation de nouveaux matériaux et de nouveaux procédés de fabrication. L'enjeu est de réduire les matières premières utilisées, d'alléger le poids du navire et de diminuer la puissance de propulsion nécessaire.

L'utilisation de composites en remplacement de l'acier pour les parois des superstructures, parties du navires situées au-dessus du pont, a fait l'objet d'une étude sur la résistance mécanique et la durabilité de différents types de jonctions entre ces parois en composite et la structure en acier du navire, en associant le Bureau Veritas. Une autre équipe s'est intéressée à la caractérisation de la tenue en fatigue³ d'hélices creuses, issues de fabrication additive (impression 3D métallique), plus légères et utilisant moins de matière première. Des essais à l'échelle 1 ont été menés sur ces parois en composites et ces hélices creuses. Ils ont permis de valider les modèles de prédiction de comportement et tenue en service en tenant compte de la complexité de ces nouveaux matériaux et des contraintes répétées⁴ que subiront ces éléments en mer durant toute la vie du navire.

Il est toutefois important de rappeler que les entreprises sont soumises à des normes et des règles qui encadrent leurs activités et leurs méthodes de conception, ce qui constitue un garde-fou nécessaire pour la sécurité des biens et des personnes ainsi que la préservation de l'environnement. Le transfert des innovations nécessite des évolutions normatives. ??? Les travaux de recherche apportent leur pierre à l'édifice en fournissant aux entreprises et aux organismes réglementaires des éléments de justification.

2. RAMSSES : *Realisation and Demonstration of Advanced Material Solutions for Sustainable and Efficient Ships*

3. *La tenue en fatigue ou résistance à l'endommagement d'une pièce ou d'une structure correspond à sa réponse aux sollicitations qu'elle subit dans le temps.*

4. *En langage de chercheur en mécanique on parle de « chargements cycliques » subies par les structures.*

Autre domaine de pointe d'ENSTA Bretagne, les technologies de l'information apportent évidemment beaucoup au domaine. Pouvez-vous nous préciser sur quels sujets?

La recherche en sciences et technologies de l'information d'ENSTA Bretagne se déploie au sein du laboratoire des Sciences et Technologies de l'Information, de la Communication et de la Connaissance (LabSTICC). C'est une UMR-CNRS commune de 600 membres avec IMT Atlantique, l'UBO, l'UBS et l'ENIB.

Le slogan du laboratoire résume bien ses activités : « *du capteur à la connaissance* ». On y retrouve les équipes de recherche du domaine numérique d'ENSTA Bretagne qui associent mathématiciens, signalistes, informaticiens, hydrographes et automaticiens et concernent l'algorithmie, les systèmes embarqués, l'automatisation, les drones, la data, l'IA, la cyber défense ... Soit tous les domaines qui interviennent dans la numérisation croissante de l'économie maritime.

Aujourd'hui, encore plus qu'hier, un navire est certes un objet mécanique se déplaçant sur la mer jolie et devant résister durablement aux agressions océaniques, mais c'est aussi un ensemble de systèmes numériques embarqués (capteurs, actionneurs, traitement de l'information) extrêmement complexe et à haute valeur ajoutée. Quand il s'agit de garantir la sécurité, d'améliorer les performances techniques ou de réduire les impacts environnementaux, toutes les disciplines entrent ainsi en jeu.

Nos recherches visent l'amélioration des technologies d'observation, de surveillance et de description de l'environnement marin, en surface mais aussi en profondeur (colonne d'eau, plancher océanique, grands fonds). Ces nouveaux observatoires sont essentiels pour la sécurisation des routes maritimes, la détection de pollutions marines, le développement des énergies marines renouvelables (EMR) ainsi que la prédiction de phénomènes météo extrêmes et d'inondations dévastatrices. Plus largement ce sont les outils nécessaires au déploiement à grande échelle de la surveillance de l'état écologique de l'océan et des zones côtières.

Toutes ces nouvelles connaissances et compétences développées depuis 15 ans, grâce à nos capacités de formation et de recherche, permettent d'améliorer la connaissance de l'environnement marin, de détecter rapidement toute anomalie et de surveiller les éventuels changements. De nouveau, c'est l'association des connaissances théoriques, des modélisations numériques et des campagnes expérimentales qui permettent de résoudre les problématiques posées par nos partenaires étatiques, tels que la Direction générale de l'armement (DGA), le Service hydrographique national (Shom), l'Office Français de la Biodiversité et les industriels.



Quelles sont les contributions d'ENSTA Bretagne à la connaissance des océans ?

Nos équipes de formation et de recherche interviennent dans la mise au point de nouveaux capteurs, de méthodes de traitement de données acoustiques et électromagnétiques innovantes, de nouveaux systèmes d'antennes ainsi que dans le développement de la robotique marine autonome. Les applications sont diverses : cartographie des fonds marins et exploration, inspection d'ouvrages immergés et suivi de population des mammifères marins. L'École participe également aux progrès des études bathymétriques (relief du fond marin) et océanographiques (étude de la colonne, des vagues et courants).

Si Brest est le berceau de l'hydrographie mondiale, incarnée par le Shom, premier service hydrographique au monde créé il y a 300 ans, ENSTA Bretagne est l'un des acteurs majeurs de la discipline. En effet, l'École délivre l'une des formations d'hydrographes les plus reconnues au monde. C'est la seule en France à être accréditée au plus haut niveau (catégorie A) par la FIG-OHI-ACI⁵. L'École vient d'obtenir « haut la main » sa ré-accréditation, alors que les exigences se sont une nouvelle fois accrues. Seule une vingtaine de formations sont accréditées au niveau A dans le monde.

Pourquoi la robotique marine d'exploration est-elle si originale et son développement si remarquable ?

Dans l'industrie comme à l'ENSTA Bretagne, la mise au point d'observatoires mobiles permet d'accélérer la connaissance du milieu océanique. Le besoin de connaissance des fonds est important car les applications sont immenses : description d'une zone maritime ; sécurité et cartographie des routes ; recherche d'objets et surveillance d'une zone ; recherche, sauvetage, inspection des ouvrages immergés pour le développement des EMR ; veille environnementale.

Et les drones permettent de prendre le relai chaque fois que les capacités d'intervention humaine sont atteintes : tâches répétitives, longues et coûteuses, zones dangereuses, grandes profondeurs. Autonomes, ils réalisent des missions de longue durée et collectent des données géolocalisées. Ces drones

5. FIG-OHI-ACI : Fédération internationale des géomètres (FIG), Organisation hydrographique internationale (OHI), Association cartographique internationale (ACI) sont trois organisations internationales associées pour développer les normes internationales de compétences considérées comme les exigences minimales des hydrographes.

autonomes de nouvelle génération sont des concentrés de hautes technologies, une somme de savoir-faire détenus par l'ENSTA Bretagne.

La connaissance des océans (fonds et surface) ne peut-elle se faire avec des moyens aériens ou spatiaux ?

Pour l'observation de zones maritimes étendues et la cartographie des zones les moins profondes, les technologies radars sont de plus en plus performantes mais restent limitées en termes de profondeur de pénétration. Les images obtenues doivent en effet pouvoir être exploitables.

À l'ENSTA Bretagne, une équipe de recherche participe, avec le Cedre⁶, aux programmes de détection des pollutions marines aux hydrocarbures, perceptibles grâce à un changement de relief à la surface de la mer. En parallèle, un autre projet⁷ vise la caractérisation des vents marins à l'aide d'imagerie satellite. La qualification des différentes méthodes d'analyse a été permise grâce à l'étude des ondes électromagnétiques en zones côtières et offshore.

En hydrographie et géodésie, une équipe met au point de nouvelles méthodes pour cartographier avec précision les petits fonds marins, comme les zones littorales et portuaires à fort trafic maritime. Ces zones, sensibles aux changements climatiques, font l'objet de mesures régulières à l'aide de systèmes d'imagerie adaptés. Avec notre partenaire⁸, nous faisons sur la fusion de données issues de différents capteurs intégrés sur un drone aérien.

Cette équipe participe également à l'amélioration des modèles météo par sa connaissance fine des interactions océan-atmosphère et de leurs effets sur la propagation des signaux radar.

Une des données clés est la mesure du taux d'humidité de l'air, dont le niveau trop élevé peut annoncer des épisodes pluvieux extrêmes ou témoigner d'un réchauffement ponctuel de l'océan. Une des études est réalisée à bord du navire océanographique *Marion Dufresne* pour l'observation du climat en océans indien et austral⁹ à l'aide d'antennes GNSS embarquées.

Avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015, le gouvernement prévoit que 40% de la production d'électricité française soit d'origine renouvelable d'ici 2030.

6. Cedre : Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux. Créé en 1979 à Brest, suite au naufrage de l'Amoco Cadiz (1978), sa mission de conseil et d'expertise est nationale.

7. Le projet CEPAMOCS est conduit avec l'AID, la DGA et le laboratoire EGS.

8. Hytech-Imaging

9. Avec un consortium de 14 partenaires



Quel est l'apport d'ENSTA Bretagne au développement des systèmes de production d'énergie marine renouvelable et comment assurer une telle longévité en environnement marin ?

Avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte du 17 août 2015, le gouvernement prévoit que 40% de la production d'électricité française soit d'origine renouvelable d'ici 2030. Quel est l'apport d'ENSTA Bretagne au développement des systèmes de production d'énergie marine renouvelable et comment assurer une telle longévité en environnement marin ?

Bien que la description des fonds marins et la modélisation des vagues et des courants soient essentielles au développement des énergies renouvelables, ce sont surtout les chercheurs en mécanique de l'IRDL qui planchent sur ces sujets. En effet, les sciences mécaniques et l'architecture navale servent à l'optimisation des plateformes offshore ainsi qu'au choix de matériaux garantissant une tenue en mer, d'au moins 20 ans.

Ces activités se déroulent principalement dans le cadre des projets de Recherche et Développement de l'ITE¹⁰ France Energies Marines et avec plusieurs partenaires comme Ifremer ou EDF.

Au sujet des éoliennes flottantes, les chercheurs de l'ENSTA interviennent sur la caractérisation mécanique de nouveaux matériaux des lignes d'ancrages et étudient leur durabilité (projet Monamoor). L'éolien en mer présente l'avantage de produire 60% d'énergie en plus que l'éolien terrestre mais les contraintes mécaniques et physiques imposées par la mer et le vent y sont plus fortes.

Afin de proposer des systèmes durables, les chercheurs développent également des outils de calcul et de conception, dans le domaine des contraintes extrêmes liées aux fortes vagues déferlantes (projet Dimpact). D'autres sujets concernent la tenue des câbles de forte puissance permettant d'acheminer l'électricité jusqu'au continent (projet Dynamo).

Enfin, l'impact sur l'environnement de ces fermes éoliennes ou hydroliennes nécessite d'être bien caractérisé. Une équipe de bio-acousticiens ENSTA Bretagne/LabSTICC intervient pour automatiser la veille sur les populations de mammifères marins autour des parcs EMR (projet Owfsomm). Le recensement de ces populations se fait en enregistrant les sons émis durant de longues périodes. Un observatoire similaire a été déployé en mer d'Iroise avec l'Office Français de la Biodiversité, zone où se côtoient mammifères marins, activités humaines et trafic maritime.

¹⁰. ITE : Institut pour la Transition Énergétique.

Que recommandez-vous à une entreprise ou un organisme qui souhaite amplifier ses compétences et ses capacités d'innovation en ingénierie maritime ?

Nous lui recommandons de s'adresser au collectif « IngéBlue ». Impulsé par ENSTA Bretagne, cet institut interdisciplinaire dédié à la formation et la recherche en ingénierie maritime est mis au service de l'économie bleue et de ses transitions. Ouvert aux organismes intéressés, il est constitué de 11 établissements publics de l'enseignement supérieur et de la recherche impliqués en ingénierie maritime, dont 7 grandes écoles (ENSTA Bretagne, ENSTA Paris, ENIB, Centrale Marseille, ENSM, IMT Atlantique, École navale), 3 universités (UBS, UBO, Toulon) et le Shom. Interlocuteur majeur du domaine maritime, IngéBlue assure une coopération interrégionale amplifiée au service des organismes étatiques, des entreprises et des collectivités.

AGIR À VOS CÔTÉS AUJOURD'HUI POUR DEMAIN



ET FAVORISER UN ÉCOSYSTÈME DYNAMIQUE SOUCIEUX DES HOMMES ET DES OCÉANS.

À TRAVERS SA FILIÈRE MER, LE CRÉDIT AGRICOLE EST PARTENAIRE DE L'ÉCONOMIE BLEUE ET ENGAGÉ DANS L'ACCOMPAGNEMENT DES TRANSITIONS MARITIMES D'AUJOURD'HUI POUR DEMAIN.

#AGIRPOURLESOCÉANS

Caisse Régionale de Crédit Agricole Mutuel du Finistère, société coopérative à capital variable, agréée en tant qu'établissement de crédit. Siège social : 7 route du Loch - 29555 Quimper cedex 9. 778 134 601 RCS Quimper. Société de courtage d'assurance immatriculée auprès de l'ORIAS sous le n° 07 022 973 (www.onias.fr). Titulaire de la carte professionnelle Transaction, Gestion Immobilière et Syndic n° CPI 2903 2021 000 000 009 délivrée par la CCI de Bretagne Ouest, bénéficiaire de la Garantie Financière et Assurance de Responsabilité Civile Professionnelle délivrées par la CAMCA, 53 rue de la Boétie 75008 PARIS. www.ca-finistere.fr. Réalisation : 02/2023 : Service Communication du Crédit Agricole du Finistère. Crédit photo : Getty Images.

