



ENSTA Bretagne et les ingénieurs de la mer

Pascal Pinot, Irène Mopin et Yann Doutreleau

Respectivement directeur, ingénieur de recherche hydrographe
et directeur scientifique à l'ENSTA Bretagne

Les sciences de l'ingénieur occupent une place centrale dans le développement des activités humaines en mer, environnement à la fois hostile et fragile, qu'il convient de mesurer et de comprendre. Sur son campus brestois, l'École nationale supérieure de techniques avancées (ENSTA) Bretagne concentre une étendue rare de domaines d'expertise en ingénierie marine pour la conception des systèmes navals d'avenir, durables et intelligents. Son excellence est reconnue sur le plan international. ENSTA Bretagne forme des ingénieurs et accueille des chercheurs à l'esprit pionnier, préparés à innover pour le développement durable de l'économie de la mer.

Des formations et recherches qui répondent aux défis de l'économie bleue

ENSTA Bretagne est une grande école d'ingénieurs dédiée à l'innovation pour la défense, le maritime et les hautes technologies en général. En sciences mécaniques, technologies de l'information et sciences de l'entreprise, près de 300 ingénieurs sont diplômés tous les ans, dont 150 ingénieurs de la mer.

ENSTA Bretagne contribue depuis sa création, en 1971, au rayonnement international du pôle d'excellence maritime brestois. Aujourd'hui rassemblées sous la bannière du Campus mondial de la mer et de l'école universitaire de recherche ISBLUE, les équipes pédagogiques et de recherche de la pointe bretonne sont particulièrement bien identifiées, sur les campus du monde où il est question de sciences et technologies marines.

ENSTA Bretagne l'est, plus particulièrement, dans les domaines de la robotique marine autonome, de l'hydrographie (*de catégorie A¹*), de l'océanographie, des observatoires marins, des systèmes embarqués sécurisés, de l'architecture navale et des énergies marines renouvelables.

ENSTA Bretagne est habilitée à délivrer le diplôme de doctorat. Les programmes de recherche sont fortement tournés vers les applications industrielles, civiles et militaires. Ils sont menés au plus haut niveau dans des laboratoires multi-établissements de référence (Lab-STICC², IRDL³). Cette proximité avec les entreprises innovantes permet aux enseignants chercheurs de préparer les futurs ingénieurs, à des environnements en constante évolution et, favorise l'ouverture de formations supérieures adaptées aux besoins de l'économie maritime.

À la rentrée 2018, quatre nouveaux programmes sont proposés.

Un master spécialisé[©] de niveau bac+6, labellisé par le pôle Mer Bretagne Atlantique, délivre un enseignement complémentaire en management de projets maritimes. En robotique, discipline en plein essor où la demande en spécialistes de haut niveau est très forte, le cursus ingénieur est complété par un master pouvant accueillir plus d'étudiants internationaux, en lien étroit avec le MIT, les universités de Plymouth, Heriot Watt ou Uppsala. Une demande forte de compétences s'exprime également en sûreté et sécurité des systèmes. Membre du Pôle d'Excellence Cyber, ENSTA Bretagne étend ces enseignements qui s'appuient sur les recherches menées en logiciel, architectures de traitement, et chaînes de communication, afin de rendre les systèmes sûrs et sécurisés : sans risque d'interruption de service, altération d'intégrité ou compromission de confidentialité.

Concernant l'emploi d'ingénieurs en conception navale, pour tous types de navires et plates-formes, la rapidité d'intégration professionnelle des jeunes diplômés, ENSTA Bretagne atteste du dynamisme du secteur et de la qualité des pro-

1. *Catégorie A : reconnaissance internationale la plus élevée, attribuée aux meilleures formations d'hydrographes par la FIG-OHI-ACI (Fédération internationale des géomètres, Organisation hydrographique internationale et Association cartographique internationale)*

2. *Lab-STICC : Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Information, de la Communication et de la Connaissance. C'est une unité mixte de recherche portée par 6 établissements tutelles : CNRS, IMT Atlantique, ENSTA Bretagne, ENIB et les universités de Bretagne occidentale (UBO) et de Bretagne Sud (UBS) (www.labsticc.fr).*

3. *IRDL : Institut de Recherche Dupuy de Lôme. C'est le laboratoire de référence en Bretagne pour les sciences mécaniques et les matériaux. Cette unité mixte de recherche du CNRS est portée par 4 établissements tutelles : CNRS, ENSTA Bretagne et les universités de Bretagne Sud (UBS) et de Bretagne Occidentale (UBO) (irdl.fr).*



Campus mondial de la mer

dossier
dossier

Un navire conçu pour l'autoroute de la mer « Europe Nord-Sud »

Un Ro-Ro ou roulier (navire de transport de fret sur remorques) a été imaginé par des étudiants en architecture navale d'ENSTA Bretagne. Ils démontrent la viabilité d'une autoroute de la mer reliant Saint Nazaire à Gijon, en Espagne. L'objectif de rentabilité a été le fil rouge de leur conception.

Ils ont dressé le cahier des charges du navire le plus adapté à cette autoroute de la mer : 6 bateaux identiques faciles à charger, faire transiter de 100 à 120 remorques

à chaque trajet soit 600 remorques par jour, tenue à la mer et manœuvrabilité par forte houle, vitesse de 18-19 nœuds.



Le navire retenu et présenté dans les colloques européens, réunit les caractéristiques suivantes : 150 mètres de long, 25 de large pour un déplacement de 14 000 tonnes. Il répondrait efficacement à la mission, à l'environnement portuaire, aux objectifs économiques et environnementaux.

Sur ce dernier point, il suit la tendance la plus marquée ces temps-ci : l'utilisation croissante du gaz naturel liquéfié (GNL ou LNG en anglais), moins cher et moins polluant. Ce choix engagé permet de réduire les émissions de CO2 et le coût du transport des marchandises, rentable durablement.

Le LNG doit être stocké dans des cuves spécifiques, à -160° pour être liquide et prévenir tout risque d'inflammation.

Les jeunes architectes navals ont donc soigneusement étudié le positionnement de ces cuves, en prenant également en compte l'accès du réservoir pour le ravitaillement.

filis formés. C'est l'école française qui forme le plus d'architectes navals. En hydrodynamique navale avancée comme en calcul de structure, design ou ingénierie *offshore*, leurs compétences sont appréciées dans tout le globe. Ainsi, à la suite lancement du programme de réalisation de 12 sous-marins en Australie, un parcours de double master en génie maritime (navires de surface et sous-marins) a été inauguré avec l'université d'Adélaïde, en partenariat avec Naval Group.

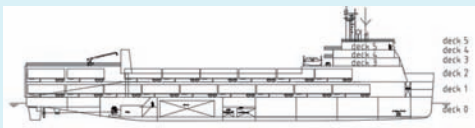
Imaginer et préparer les systèmes et technologies d'observation de demain

ENSTA Bretagne est au cœur de la recherche sur l'océan. Elle prépare les futurs systèmes et technologies d'observation et de compréhension du milieu marin. Une de ses principales contributions concerne le développement d'observatoires mobiles, les robots autonomes, qui seront les prochains explorateurs des mers.

Le besoin d'utiliser des robots se fait sentir, car le milieu marin est complexe, encore trop peu connu et souvent dangereux. Pour pouvoir atteindre des zones inaccessibles, ou pour réaliser des missions de très longues durées sur des zones très étendues (la France possède plus de 3 000 km de côtes), on va chercher à rendre les robots autonomes, sans liens avec les opérateurs humains.

Les chercheurs de l'ENSTA Bretagne travaillent depuis plusieurs années sur cette autonomie des robots, autant marins (USV: Unmanned Surface Vehicle) que sous-marins (AUV : Autonomous Underwater Vehicle).

L'école a plusieurs fois été primée dans les compétitions internationales (championnat d'Europe de robotique sous-

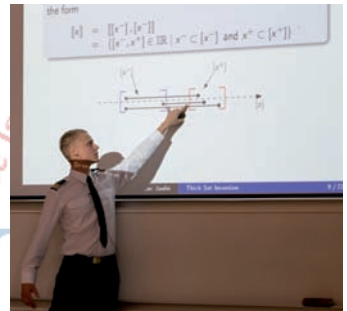
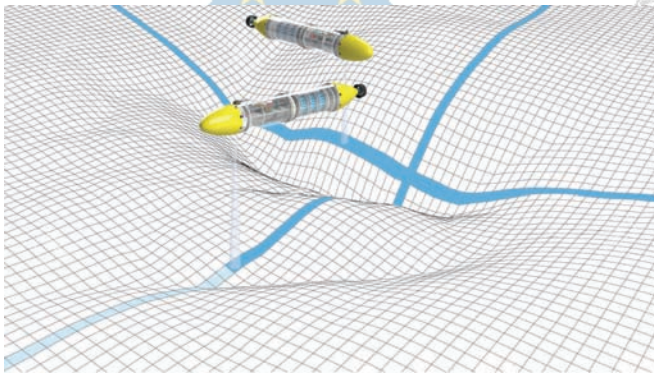


marine autonome, coupe du monde de robots voiliers...). Ces recherches nécessitent des compétences précises dans des domaines scientifiques variés. Les nombreuses thèses tentent de répondre à quatre grandes difficultés :

- **La planification de la mission.** Le robot doit être capable d'anticiper sa trajectoire dans des conditions environnementales complexes (courant, vents...). C'est l'objectif d'une thèse en-cours, portant sur le développement d'une bouteille à la mer intelligente, capable de choisir la veine de courant dans laquelle elle va dériver, en parfaite autonomie. Les tests grandeur nature viseront le tour d'Ouessant.

- **Le guidage et le contrôle-commande.** Le drone doit se diriger avec précision et être capable de réguler en temps réel sa trajectoire.

- **La localisation et le positionnement.** Les ondes électromagnétiques se propageant mal dans l'océan, des capteurs acoustiques ou optiques sont majoritairement utilisés afin d'observer et d'analyser l'environnement dans lequel le drone évolue et lui permettre de se géolocaliser. Les thèses de Benoît Desrochers (IETA 2014) et de Simon Rohou constituent des avancées remarquables dans ce domaine.



Améliorer l'estimation de la trajectoire d'un robot sous-marin autonome (thèse de Benoît Desrochers, ENSTA Bretagne / Lab-STICCI / DGA4, mai 2018)

Nouvelle approche de programmation pour la localisation de robots sous-marins et l'exploration d'une zone sous-marine étendue (thèse de

Simon Rohou, ENSTA Bretagne/Lab-STICCI/DGA4/université de Sheffield, déc. 2017)

- **La coordination.** Dans le cas de groupes de robots agissant pour une même mission, ils doivent être en mesure de communiquer entre eux pour collaborer et fusionner leurs informations.

Percevoir et étudier l'environnement marin est un thème majeur de recherche de l'ENSTA Bretagne

P lusieurs domaines y sont représentés. L'hydrographie a pour objectif de créer des modèles numériques 3D de la topographie du fond marin, destinés à l'élaboration des cartes marines. L'**océanographie** permet d'améliorer les connaissances sur les courants marins et le transport sédimentaire. Des études conduites avec le SHOM⁴ portent, par exemple, sur l'assimilation des données des radars haute fréquence du Finistère, pour perfectionner les modèles de courants de la mer d'Iroise. Dans un même temps, dans le cadre des investissements d'avenir et en vue

4. SHOM : Service hydrographique et océanographique de la Marine.



du déploiement d'hydroliennes dans le Raz Blanchard, une équipe modélise avec France Énergie Marine et l'IUEM⁵ le déplacement des sédiments grossiers, tels que les galets, qui peuvent endommager les pales des hydroliennes lors de leur charriage par des forts courants (un galet de 5 cm de diamètre commence à se déplacer dès 2 nœuds de courant).

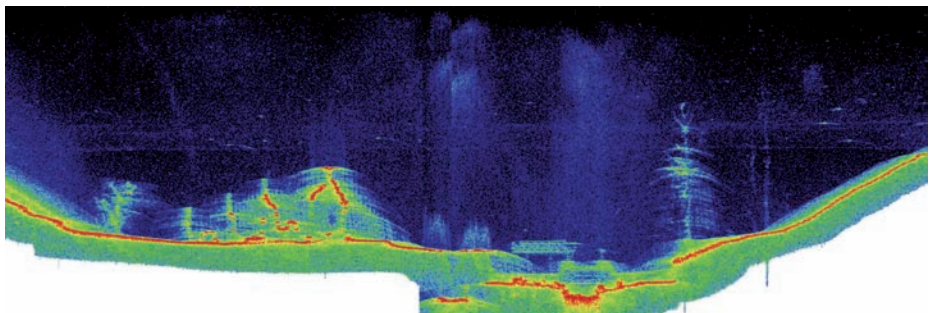
Les drones autonomes marins ou sous-marins doivent être adaptés à leurs missions.

Il peut s'agir d'identifier des changements dans l'environnement marin, comme le déplacement de dunes de sable sur le fond, ou la détection, localisation et classification d'objets. Avec DGA⁶ Techniques Navales, les études portent en particulier sur la reconstruction de ces objets sous-marins (de type mine) par acoustique, pour se substituer aux capteurs optiques inefficaces en eaux turbides. Le but, qui s'apparente à de l'échographie 3D, est de générer une image 3D précise et géoréférencée pour permettre, à terme, la reconnaissance automatique de mines sur le fond marin.

La contribution des drones à la cartographie marine est également en préparation, aussi bien de zones difficiles, non accessibles aux navires de surface (comme l'estran), que de zones très étendues. Cartographier ces vastes espaces maritimes, à l'aide d'engins autonomes, intéresse fortement les acteurs de la sécurité en mer ainsi que les archéologues sous-marins. ENSTA Bretagne développe l'archéo-robotique, afin de confier à des drones sous-marins autonomes les missions de recherche d'épaves. L'école a apporté cette contribution innovante aux recherches de la Cordelière, conduites par le DRASMM⁷ en juillet 2018 au large de Brest.

L'inspection d'ouvrages immergés constitue un autre type de mission. Depuis 2016, un programme inédit de recherche, innovation et formation est mené sur le lac de Guerlédan, avec EDF et de nombreuses entreprises. Le suivi du barrage et des infrastructures du lac par des drones autonomes sert de base expérimentale pour

Profil des ruines et arbres immergés du lac de Guerlédan à partir d'un sondeur multifaisceau (projet étudiant encadré par Irène Mopin), ENSTA Bretagne / Lab-STICC1 / SHOM (mars 2017).



Etudiants ENSTA Bretagne

5. IUEM : Institut universitaire européen de la mer

6. DGA : Direction Générale de l'Armement. Organisme tutelle de l'ENSTA Bretagne.

7. DRASSM : Département des recherches archéologiques subaquatiques et sous-marines (ministère de la Culture).

ENSTA Bretagne, Simon Robou



Les élève ingénieurs en hydrographie installent un sondeur mono-faisceau pour la cartographie du lac de Guerlédan.

les roboticiens et les hydrographes de l'ENSTA Bretagne, rejoints avec intérêt par leurs collègues de Palaiseau.

L'exploration du monde sous-marin et le développement de drones autonomes impliquent de nombreuses connaissances, complexes et hétéroclites. Afin de contribuer efficacement aux innovations industrielles du domaine, ENSTA Bretagne mobilise ses nombreuses compétences au sein de laboratoires communs avec les entreprises, telles que Thales et IXBLUE. L'école a également créé un ambitieux programme scientifique transverse au sein du laboratoire Lab-STICC (« *Perception, Robotics, Autonomous System* »), extrêmement bien accueilli par le CNRS⁸.

Conception navale : quels systèmes pour quels besoins demain ?

Représentant 75 % de la surface terrestre et une profondeur moyenne d'environ 4000 mètres, le milieu marin est la voie principale du commerce international ; il recèle de nombreuses richesses naturelles encore inexploitées. Il représente un potentiel majeur de croissance des activités humaines, qui nécessitent la conception et le développement d'infrastructures et systèmes supports : on pense à des activités traditionnelles (navires, plates-formes d'exploitation pétrolière), émergentes (éoliennes en mer, hydroliennes) voire plus futuristes (ports *offshore*, îles artificielles, aéroports océaniques, usines d'extractions des ressources minières).

Ces systèmes sont confrontés à plusieurs enjeux majeurs.

Le premier, inhérent à tout système industriel, est celui de l'efficacité (capacité de tonnage d'un porte-conteneurs, capacité de production d'une plate-forme *offshore*...) : l'outil numérique, de plus en plus intelligent, joue un rôle grandissant pour optimiser ces capacités.

8. Centre national de la recherche scientifique



D.R.

Les travaux sur la durabilité des systèmes en mer sont conduits au sein du laboratoire IRDL (unité mixte de recherche du CNRS) et d'un laboratoire commun avec Naval Group. Les outils numériques de prédiction qui y sont créés, dans le but d'être intégrés aux outils de conception navale, sont validés par des essais multi-échelles réalisés au centre d'essais ENSTA Bretagne (www.masmeca.fr). Exemples : projet

ANR/France Energies Marines « INDUSCOL » sur la durabilité en service des structures multi-matériaux pour la production d'énergies marines renouvelables ; projet européen H2020 RAMSSES sur la durabilité en service de propulseurs obtenus par fabrication additive, associant module composite et structure métallique).

Le second enjeu, relativement spécifique au milieu marin, tient à son hostilité tant du point de vue des phénomènes physico-chimiques, induits par l'eau de mer (« *biofouling* », corrosion, vieillissement), que des sollicitations mécaniques dues aux phénomènes extrêmes (tempêtes) ou réguliers (houles) : il pose la question de la durabilité des systèmes en mer et, plus généralement, de leur sécurité dans un environnement agressif.

Le troisième enjeu, devenu aujourd'hui totalement incontournable, est celui de la préservation du milieu : une exploitation durable doit induire, dans la démarche de conception, le réflexe de limiter l'impact sur l'environnement :

- à la construction (limitation des rejets, efficacité des process),
- en service (choix de matériaux éco-compatibles, rendement énergétique de la propulsion, allègement des structures),
- en fin de vie (procédé de démantèlement, réutilisabilité des matériaux).

Dans le domaine des systèmes propulsifs ou de production d'énergie marine renouvelable, l'allègement des structures et en particulier, des pales est visé. L'utilisation de matériaux composites et les assemblages par collage y participent. Les conditions de mise en œuvre sont modélisées et

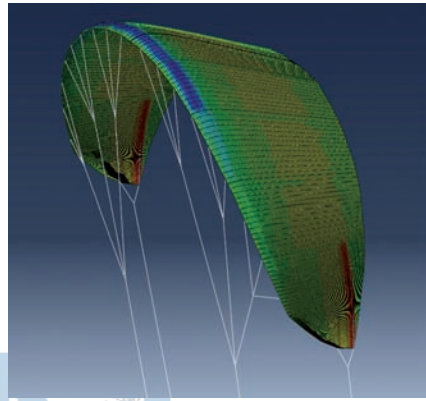


D.R.

Le projet ANR/DGA « APPHY » vise à intégrer plus de précision dans les outils de conception navale, en prenant en compte les chargements hydrodynamiques liés aux impacts des vagues, la répétition et la variabilité de ces efforts subis par le navire. Le gain de précision attendu en calcul de structure permettra de réduire le poids, limiter les avaries, tout en rallongeant les durées de vie des navires. Les essais de validation sont conduits au bassin d'essais du centre IFREMER de Brest.

testées au centre d'essais ENSTA Bretagne. Au-delà des systèmes de propulsion traditionnels par hélice, bien maîtrisés, ENSTA Bretagne met au point des systèmes de propulsion alternatifs et écologiques, tel que le projet de navire du futur *Beyond the sea*®, dont l'efficacité a été démontrée. Son système de propulsion hybride original, qui associe la motorisation classique à une énergie vélique plus puissante que la voile traditionnelle (cerfs-volants géants), permet de réduire la consommation de carburant et l'impact environnemental de 20%.

D.R.



Le projet de navire du futur Beyond the sea® vise à concevoir un système de propulsion hybride, associant une énergie vélique plus puissante que la voile traditionnelle, à la motorisation classique : des cerfs-volants géants (photo 15) sont déployés dès que la météo est favorable, réduisant la consommation de carburant et l'impact environnemental de 20%. Des tests concluants ont été réalisés sur le navire expérimental « KiteLab » au printemps 2017.

Ces recherches sont menées en fort partenariat avec les industriels et d'autres académiques, au sein de l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDLD) et d'un laboratoire commun avec Naval Group.

Le navire du futur sera propre, économe, sûr, intelligent.

Totalement transverses à l'ensemble des systèmes conçus et opérés par l'homme en milieu marin, ces préoccupations sont au cœur de la formation des architectes navals à l'ENSTA Bretagne. Ils acquièrent une vision complète du navire, sont initiés aux méthodologies de conception globale et les mettent en pratique dans le cadre de projets de plus en plus complexe, dont l'exercice de « boucle navire » en constitue le point d'orgue, comme illustré par le projet de roulis (encart page 74).

Cette vision système est complétée par des compétences techniques pointues en modélisation mécanique, qui rend les ingénieurs de l'ENSTA Bretagne aptes à appréhender des phénomènes aussi complexes que la modélisation de la houle, le tossage des navires, la durabilité en fatigue d'assemblages soudés ou multi-matériaux, la conception de propulseurs obtenus par fabrication additive, associant module composite et structure métallique (projet européen H2020 RAMSSES).