

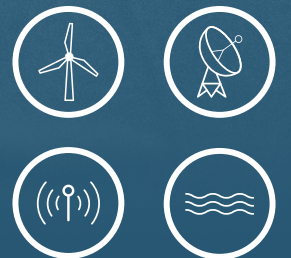
BILAN SCIENTIFIQUE



ENSTA
BRETAGNE



RE CHER CHE ▶



UNE ACTIVITÉ DE RECHERCHE TOURNÉE VERS LA DÉFENSE ET L'INDUSTRIE

Yann Doutreleau, directeur de la recherche

Les activités de recherche d'ENSTA Bretagne relèvent des sciences de l'ingénieur et répondent à des questions et enjeux applicatifs civils et militaires, posés par les entreprises industrielles et le ministère des Armées (DGA, AID). Les domaines d'application sont principalement : les systèmes de défense, le maritime, les transports terrestres et aériens, l'aérospatiale, l'énergie et la santé.

Les équipes de recherche font partie de laboratoires et de chaires industrielles d'envergure nationale ou internationale, en coopération avec d'autres écoles d'ingénieurs, universités, les organismes nationaux de recherche (CNRS en particulier) et les partenaires industriels historiques de l'école.

Le centre de recherche de l'école ne cesse de s'agrandir. Près de 300 personnes le composent, réparties dans une quinzaine d'équipes thématiques. Il s'étend dans 6 bâtiments (7500 m²) et englobe de nombreux moyens d'essais en sciences mécaniques, pyrotechnie, technologies de l'information, cyber et robotique. Un 7^e bâtiment est en préparation. Il sera composé d'un vaste bassin d'essais pour les recherches sur les systèmes de drones marins et aériens.

Ces développements sont le fruit d'une stratégie de recherche ciblée sur des enjeux d'avenir qui ont obtenu le soutien de l'Europe, de l'Etat français, de la région Bretagne et de Brest métropole. 6 projets scientifiques impli-

quant les équipes ENSTA Bretagne seront financés de 2021 à 2027 via le CPER (Contrat de Projet Etat-Région) pour un montant total de 9,85 M€, sur des thèmes comme la **conception navale, l'observation des océans, les technologies spatiales et drones, la cyber-maritime, la digitalisation de l'industrie, les matériaux pour la transition écologique, la robotique d'exploration.**

Comme le montrent les bilans des équipes de recherche, la dynamique contractuelle et la production scientifique (au travers des publications) sont cette année encore à un excellent niveau. En témoigne le classement international thématique «Engineering & Technology» du Times Higher Education (THE) d'octobre 2022, dans lequel l'école se positionne à la **236^e place mondiale par l'ampleur de sa recherche partenariale avec l'industrie.**

yann.doutreleau@ensta-bretagne.fr



277

chercheurs, ingénieurs, post-doctorants, techniciens et doctorants

20

thèses soutenues (près de 140 doctorants encadrés)

247

publications (hal.science)

CES RECHERCHES APPLIQUÉES SONT MENÉES DANS 3 GRANDES DISCIPLINES :

les sciences
mécaniques



UMR CNRS 6285
www.lab-sticc.fr

▶ P.18

les technologies de
l'information et de la
communication



EA 7529
foap.cnam.fr

▶ P.22

les sciences
humaines
pour l'ingénieur



UMR CNRS 6027
www.irdl.fr

▶ P.27

+
D'INFOS



CHAIRE INDUSTRIELLE ANR «SELF-HEATING»

ENSTA Bretagne, trois sociétés du groupe Safran, Naval Group, ainsi que l'institut P', mènent un vaste programme de recherche sur 4 ans.

Co-financé par l'ANR et les partenaires industriels, il est entièrement dédié à la mesure de la signature thermique des différents matériaux étudiés afin de prévoir leur endommagement et leur endurance en service sous sollicitations cycliques.

Entretien avec Sylvain Calloch, titulaire de la chaire, Professeur des Universités à l'ENSTA Bretagne et chercheur à l'IRD L.

Comment est née la chaire industrielle Self-Heating ?

Safran et Naval group sont des partenaires historiques de notre laboratoire. Ils accompagnent et financent nos travaux sur la méthode d'auto-échauffement pour prédire la fatigue des matériaux et des structures depuis de nombreuses années. Cette méthode, en rupture par rapport aux approches classiques, permet de déterminer de façon rapide les propriétés à la fatigue des matériaux métalliques et des composites. Dans le cadre de la chaire industrielle, nos travaux ciblent la construction navale et le domaine de l'aéronautique.

Cette méthode est non seulement fiable et précise, mais elle a aussi l'immense avantage de réduire considérablement la durée des campagnes d'essais.

Quel est le programme de la chaire ?

À ce jour, et à notre connaissance, il n'existe aucun programme équivalent dans le monde. La volonté commune de Safran et de Naval Group est de développer et d'étendre cette approche scientifique à l'ensemble des matériaux et des assemblages utilisés dans leurs applications respectives et d'améliorer très significativement et rapidement la connaissance des paramètres jouant sur les propriétés à la fatigue des matériaux qu'ils utilisent (e.g., température, procédé de fabrication, nature du chargement, traitements de surface, etc.).

La gamme des matériaux et des procédés de fabrication est très large. Elle englobe des matériaux métalliques (e.g., aciers haute résistance, des superalliages base nickel, ...) et des matériaux composites (e.g., à fibres courtes, stratifiés, ...), mais aussi des matériaux issus de la fabrication additive.

Les partenaires industriels pourront ainsi disposer d'une capacité nouvelle d'innovation dans le domaine des matériaux et des assemblages, afin d'atteindre des performances

nouvelles, de la compétitivité ou de réduire leurs impacts environnementaux.

Quelques exemples : améliorer les prévisions de la tenue en service des matériaux et des structures, remplacer un matériau par un autre quand les ressources s'amenuisent ou que les prix flambent, utiliser de nouvelles solutions de fabrication de pièces (collage, fabrication additive)... et ainsi participer à la préparation de l'avenir de ces grands secteurs industriels.

Vous êtes à mi-parcours du programme de la chaire industrielle « self-heating ». Quel bilan faites-vous de ces 2 années écoulées ?

De nombreux résultats ont déjà été obtenus, tant sur le plan expérimental que sur le plan de la modélisation et de la simulation numérique. Ils ont été présentés dans une dizaine de congrès internationaux et ont donné lieu à la publication d'une dizaine d'articles dans des revues scientifiques internationales renommées. Par ailleurs, il est à noter qu'un effort important est fait pour accompagner les partenaires industriels de la chaire dans l'appropriation des techniques et des outils développés, lors de journées dédiées, par des formations ou par la fourniture de progiciels.

*laboratoire IRDL (PTR5)
sylvain.calloch@ensta-bretagne.fr*

LA CHAIRE EN BREF

44 scientifiques et ingénieurs impliqués
dont **12** doctorants et post-doctorants

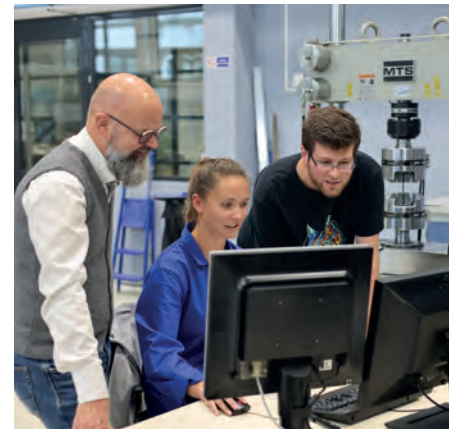
2.05 M€

Budget pour 4 ans co-financé à 50% par l'ANR et à 50% par les partenaires industriels

L'Institut de Recherche Dupuy de Lôme en sciences mécaniques
UMR CNRS 6027 Institut Carnot ARTS
www.irdl.fr
325 membres dont 130 doctorants de 4 établissements
(ENSTA Bretagne, ENIB, UBS et UBO).

IRD L
Institut de Recherche Dupuy de Lôme

“
Prévoir les propriétés en fatigue des matériaux grâce à la mesure de leur signature thermique sous sollicitation cyclique



KÉSAKO ?

«Self-Heating» (auto-échauffement)

Le laboratoire IRDL a développé une méthode basée sur la mesure de la signature thermique d'un matériau sous sollicitation cyclique, aussi appelée mesure de « l'auto-échauffement » (« self-heating » en anglais) pour déterminer les propriétés en fatigue à grand et très grand nombre de cycles des matériaux et des structures.

L'auto-échauffement sous sollicitation cyclique est une évolution de la température d'un matériau, observée dans des conditions expérimentales précises. Il est le signe que le matériau se dégrade ou qu'un endommagement s'amorce.

En reproduisant au centre d'essais d'ENSTA Bretagne les sollicitations subies en service par le matériau ou la pièce étudiée, cette technique permet de déterminer les points de fragilité, les conditions de naissance de l'endommagement, mais également, d'alimenter les codes de calcul des bureaux d'étude permettant de dimensionner au plus juste les pièces d'un bâtiment de surface, d'un sous-marin ou d'un avion.



voir la vidéo



LE COLLAGE MULTI-MATÉRIAUX

La modélisation, un outil de prédiction pour assembler des structures innovantes.

Le collage est de plus en plus utilisé dans l'industrie pour ses nombreux avantages en termes d'allègement, d'association de matériaux de natures diverses ou d'assemblage de petites structures.

L'optimisation par la modélisation de ces assemblages est nécessaire pour atteindre des performances précises et réduire l'empreinte carbone de certaines activités, s'adapter à de nouvelles normes ou développer de nouveaux marchés (nouveaux matériaux, nouvelles énergies...).

Pour cela, les industriels font appel aux chercheurs du pôle "assemblages multi-matériaux" du laboratoire IRDL qui étudient notamment la tenue à long terme de l'adhésif et de la structure multi-matériaux souhaitée, proposent des innovations dans les procédés d'assemblages et développent des techniques hybrides.

« Nous reproduisons en laboratoire le procédé d'assemblage industriel à étudier et réalisons des essais sous différents chargements mécaniques afin de mettre au point des

modèles prédictifs de comportement de la structure selon les contraintes qu'elle subit. », présente David Thévenet.

L'une des thématiques de recherche est l'évaluation de la tenue de structures collées sous l'effet de la fatigue, un endommagement qui apparaît dans des structures soumises à des chargements variables.

Elle conduit au développement de fissures entraînant la perte de fonctionnalité ou la rupture brutale de la pièce. La thèse de Cyril Bernolin a étudié l'amorçage puis la propagation de fissures de fatigue au sein d'un joint de colle afin de prédire la durée de vie d'assemblages collés aéronautiques en collaboration avec Safran Composites.

Autre phénomène physique étudié, le fluage correspond à la déformation de l'adhésif sous l'effet d'une contrainte constante. Marthe Loiseau a étudié et modélisé dans sa thèse le comportement en fluage de joints de colle pour les connecteurs développés par ColdPad pour des applications industrielles offshore.

Laboratoire IRDL (PTR2)
david.thevenet@ensta-bretagne.fr

2 thèses
soutenues
en 2022

LORENZO REÇOIT LE PRIX J. POMEY

La Société Française de Métallurgie et de Matériaux (SF2M) a remis le prix annuel Jacques Pomey à un jeune chercheur en mécanique, sur le thème « Fatigue et Fabrication Additive ». Lorenzo Bercelli s'est brillamment distingué par ses travaux de thèse sur la caractérisation en fatigue de pales d'hélices marines creuses, réalisées en fabrication additive par dépôt de couches de métal (procédé WAAM).



VOTRE PARCOURS ?

Jeune diplômé en mécanique, ingénieur composites à Naval Group, j'ai rejoint ENSTA Bretagne (laboratoire IRDL) pour y effectuer ma thèse en 2018-2021, avant d'y être recruté comme enseignant chercheur en modélisation mécanique avancée.

LE PRIX JACQUES POMEY ?

C'est un honneur et une grande satisfaction. J'ai présenté ma thèse lors des Journées de Printemps de la SF2M. Mes recherches avaient été encadrées par la DGA, Naval Group et l'équipe « fatigue » d'ENSTA Bretagne. Elles faisaient partie du vaste programme européen « RAMSSES », qui vise à améliorer la durée de vie de grands navires tout en réduisant leur empreinte environnementale.

LE SUJET ?

L'impact du procédé de fabrication WAAM sur la durabilité d'une pièce. Il s'apparente à de l'imprimerie 3D à grande échelle et permet de concevoir des pièces inédites en utilisant moins de métal.

Cette technique de fabrication additive est un empilement de couches de matière, chaque couche étant une juxtaposition de cordons de soudure. Ce procédé de production est récent dans l'industrie qui a grand besoin d'outils de prédiction pour dimensionner correctement les pièces.

Ma thèse permet de disposer de codes de calcul pour anticiper la tenue en service, en mer, d'une pale d'hélice en métal produite avec le procédé WAAM et qui a donc la particularité d'être creuse !

Ces codes de modélisation tiennent compte

des spécificités de cette géométrie, de la présence de défauts internes dans les couches de matière et de l'existence d'une forte rugosité en surface.

Mes recherches se poursuivent dans le cadre de la chaire industrielle ANR Self-Heating.

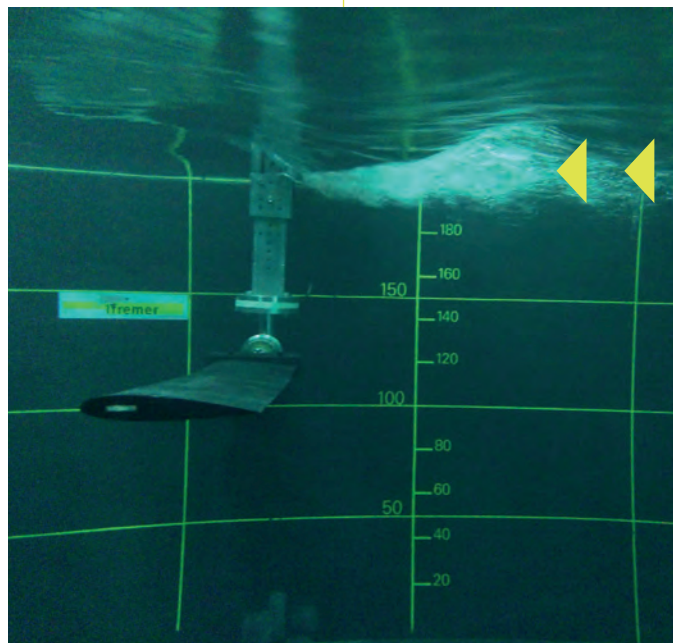
Laboratoire IRDL (PTR5)
lorenzo.bercelli@ensta-bretagne.fr

voir la vidéo
du projet
RAMSSES



COMMENT AMÉLIORER LA PERFORMANCE DES FOILS ?

L'utilisation du foil sur les bateaux de compétition, comme les IMOCA, permet de gagner en vitesse. Leur usage se démocratise.



Depuis plusieurs dizaines d'années, on voit fleurir sous la coque des planches et des bateaux à voile des sortes d'ailes sous-marines, appelées foils. Constituées d'une partie horizontale, reliée à la coque par un bras vertical, leur fonctionnement s'apparente à celui de l'aile d'un avion. Lorsque la vitesse du bateau est suffisamment importante, la partie horizontale du foil fait décoller la carène. Ainsi, les frottements du bateau avec l'eau sont réduits et celui-ci gagne en vitesse. Cette rapidité est actuellement recherchée pour les voiliers de compétition. Mais ce n'est pas la seule application du foil. Des recherches sont en cours pour réduire la consommation électrique ou en carburant des futurs bateaux à moteurs.

Mise au point de modèles complexes

Améliorer la performance des foils est donc un enjeu d'avenir. C'est pourquoi une équipe de chercheurs en mécanique et hydrodynamique de l'ENSTA Bretagne (laboratoire IRDL), en partenariat avec l'IFREMER et l'IRENav, a lancé en 2020 le projet OptiFoil. *"Dans l'idéal, il s'agit de développer des modèles numériques capables d'évaluer la performance de n'importe quel type de foil"*, présente Matthieu Sacher, maître de conférences à l'ENSTA Bretagne et spécialiste des interactions fluide-structure.

La modélisation de certains phénomènes physiques, comme la ventilation ou la cavitation qui peuvent apparaître lorsque le foil évolue proche de l'interface air-eau, ou la réponse non-linéaire de la structure d'un foil sous un chargement hydrodynamique, constituent un véritable défi scientifique.

Or, ces phénomènes peuvent influencer l'efficacité du foil. Tout l'enjeu est donc de limiter leurs effets !

Validation des modèles par des essais en bassin.

Pour cela, les scientifiques du projet OptiFoil ont décidé de tester dans un premier temps la performance du foil en fonction des propriétés mécaniques de sa structure. Dans un bassin à circulation d'eau d'IFREMER à Boulogne-sur-Mer, ils ont étudié la réponse structurelle du foil lorsque celui-ci est soumis à un écoulement. Le design des fibres qui composent sa structure peut en effet influencer sa performance. *"Lorsque le foil avance dans l'eau, les efforts hydrodynamiques induisent des déplacements et des déformations de sa structure. Des couplages de flexion-torsion peuvent apparaître et modifier la vitesse de l'engin."* Cette force hydrodynamique se décompose en une force verticale, appelée portance, qui permet de soulever le foil et donc le bateau ainsi qu'une force horizontale, la trainée. *"Les résultats expérimentaux sont en cours d'analyse. Ils nous permettront d'affiner nos modèles."* Dans un second temps, c'est la géométrie du foil qui sera testée.

Avec le projet OptiFoil, les scientifiques seront capables de proposer des modèles d'évaluation de la performance des foils.

"Pour le moment, nous nous sommes concentrés sur des cas d'étude stationnaires. Nous espérons poursuivre ces développements dans un futur projet, en incluant des cas dynamiques : houle, phases de transition (virement de bord, changements de réglages, etc.) ou réponses dynamiques face à des perturbations extérieures."

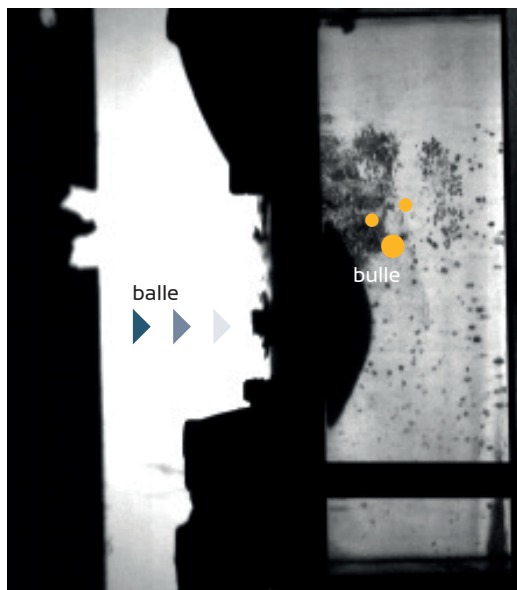
Pour mener à bien ces recherches les chercheurs du projet OptiFoil ont constitué une équipe dédiée qui fait intervenir des doctorants et ingénieurs de recherche en postdoc, ainsi que des élèves-ingénieurs de l'ENSTA Bretagne et des étudiants du master recherche de l'Ecole-Navale. Le projet OptiFoil est financé par les instituts Carnot ARTS et MERS.

*laboratoire IRDL (PTR3)
matthieu.sacher@ensta-bretagne.fr*

“

Dans l'idéal, il s'agit de développer des modèles numériques capables d'évaluer la performance de n'importe quel type de foil

ÉTUDIER LES PROPRIÉTÉS PYROTECHNIQUES DES MATÉRIAUX ET S'EN PROTÉGER



Implosion d'une bulle de cavitation induite par choc dans une structure enfermant un liquide, soumise à un impact balistique d'une balle de 9mmx19mm. Projet ANR PROBALCAV.

La caractérisation des effets des explosions et leurs barrières demeurent les préoccupations de l'équipe « Systèmes Pyrotechniques » ENSTA Bretagne, membre du laboratoire de mécanique IRDL. L'année 2022 a commencé par la soutenance de thèse CIFRE Airbus de Jérémie Tartièrre sur le formage par explosif des pièces métalliques de grandes dimensions destinées aux avions.

Trois thèses ont démarré en 2022. Celle d'Aymerick Reinders, financée par le projet AID COBADI, vise la conception de barrières en mousse aqueuse pour l'atténuation des effets de souffle. Celle de Baptiste Reynier, financée par le CEA DAM du CESTA s'intéresse aux éjectas émis lors d'impacts à plus de 18000 km/h. Enfin, celle de Julie Morand, financée par le CEA DAM Le Ripault, étudie un système d'amorçage des explosifs par impact : l'impact est généré à haute vitesse grâce à la propulsion du projectile par l'énergie d'un laser impulsionnel de puissance, dispositif le plus adapté pour maîtriser les délais d'amorçage d'explosifs peu sensibles.

ENSTA Bretagne a de plus été intégrée à l'Aerobalistic Range Association qui s'intéresse à la balistique, aux canons et aux lanceurs et réunit les grands centres de recherche nationaux et internationaux du domaine tels que le CEA.

Enfin, l'année a été marquée par la mise en service d'une nouvelle zone d'essais pyrotechniques, dédiée à l'étude de très petits échantillons de matériaux énergétiques. Ils sont testés afin de déterminer leurs propriétés thermomécaniques. Un exemple : à l'aide de barres d'Hopkinson on étudie l'impact du choc sur un matériau énergétique quand il est propulsé à très grande vitesse, on analyse l'endommagement mécanique produit sur le matériau et les effets sur ses propriétés d'allumage et de combustion.

laboratoire IRDL (PTR3)
michel.arrigoni@ensta-bretagne.fr

PENSER LA FUTURE PRODUCTION ÉLECTRIQUE ET LE DÉVELOPPEMENT DE L'ÉOLIEN FLOTTANT

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. Un objectif ambitieux sur lequel planchent des chercheurs en mécanique et ingénierie maritime d'ENSTA Bretagne, au sein du laboratoire IRDL.

En collaboration avec France Energies Marines et plusieurs partenaires comme Ifremer ou EDF, ils ont choisi d'agir sur la durabilité en mer des éoliennes flottantes. Ces projets de recherche font partie du plan d'investissement France 2030. L'éolien offshore présente l'avantage de produire 60% d'énergie en plus que l'éolien terrestre. En effet, la vitesse du vent est plus rapide et sa durée plus constante au large des côtes. En contrepartie, la mer et le vent imposent de fortes contraintes mécaniques et physiques sur les parcs éoliens offshore. Afin de proposer des systèmes durables, les chercheurs développent des outils de calcul et de conception. Les recherches

en cours visent notamment une meilleure prédiction des contraintes liées aux vagues déferlantes et des propriétés mécaniques de nouveaux matériaux, deux moyens d'optimiser la tenue en service des parcs et de réduire le coût des opérations de maintenance.

Codes de calcul, outil de modélisation et de mesure se développent pour imaginer les dispositifs de demain. Les futures éoliennes flottantes devront disposer d'un mât résistant aux tempêtes et aux vagues les plus violentes ainsi que de câbles semi-rigides pouvant durer en mer au moins 20 ans. Ces câbles servent à retenir la plateforme ou acheminer l'électricité jusqu'au continent.

Si aujourd'hui il existe des éoliennes offshore d'une puissance de 6 mégawatts capables d'alimenter en électricité une ville de 5000 habitants, l'objectif à terme est de produire des systèmes d'une puissance de 8 à 10 mégawatts.

laboratoire IRDL (PTR 2 et 5)
younes.demmouche@ensta-bretagne.fr



OBJECTIF

produire des
systèmes d'une
puissance de

10
MÉGAWATTS



L'ACOUSTIQUE PASSIVE, UNE MÉTHODE DE MESURE DE L'ÉTAT ÉCOLOGIQUE DE LA MER

Le bon fonctionnement des écosystèmes marins repose, entre autres, sur la nature des espèces présentes, leur abondance et leur diversité. Pour recueillir ces données, les équipes de recherche en physique marine, systèmes d'observation et traitement de signal (laboratoire Lab-STICC) utilisent une méthode d'observation non invasive : le suivi par acoustique passive.

Cetiroise, un observatoire sous-marin

L'équipe dirigée par l'enseignante chercheuse Flore Samaran, utilise des enregistreurs sous-marins équipés d'hydrophones pour capter le paysage sonore sous-marin. Ensuite, le traitement des enregistrements sonores permet de reconnaître les différentes sources de bruit et d'identifier des espèces ou des groupes d'espèces fréquentant la zone. Début 2022 à la demande de l'Office Français de la Biodiversité (OFB), son équipe a mis en place le projet « Cetiroise » financé par le plan de relance « next generation EU » de l'Union européenne. Sept points d'écoute et d'enregistrement ont été déployés pour une durée d'un an.

« *Le suivi par acoustique passive représente une solution non intrusive idéale pour identifier dans l'espace et dans le temps les différentes espèces de cétacés fréquentant cette zone maritime* », précise Flore Samaran.

OSmOSE, un dispositif collaboratif d'analyse des données

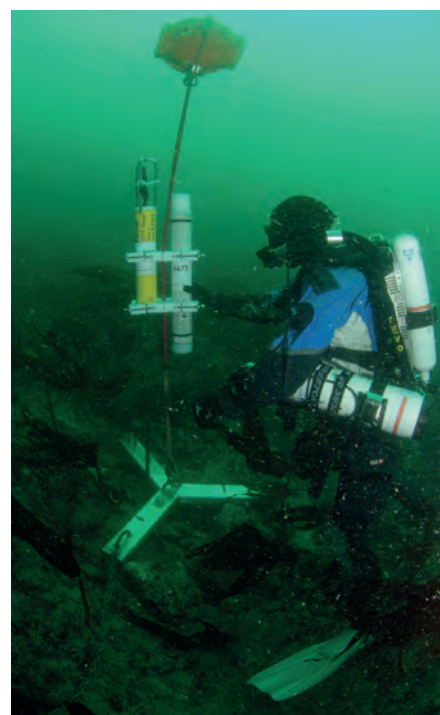
Pour l'analyse des enregistrements sous-marins, les chercheurs s'appuient aussi sur les outils de traitement de données développés en open source par le groupe de recherche OSmOSE¹. Lancé par ENSTA Bretagne en 2018, son objectif est de standardiser et partager les méthodes et résultats de leur communauté de recherche afin de faciliter la collaboration entre équipes de recherche dans le domaine de l'acoustique sous-marine.

Pour l'instant, le projet a permis le développement d'une plateforme de stockage et de traitement des données ainsi qu'une application web utilisée pour l'annotation des sons. « *L'étape d'annotation est essentielle pour l'apprentissage des sons par l'algorithme et leur reconnaissance automatique par la suite* », explique Dorian Cazau enseignant chercheur et coordinateur du groupe. Les deux outils sont hébergés à l'Ifremer.

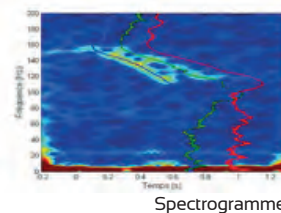
Pour annoter un son, et donc le caractériser dans l'algorithme, celui-ci doit d'abord être reconnu. Pour cela, il est isolé des autres sons et représenté visuellement sous forme de spectrogramme². L'analyse des spectrogrammes mobilise les sciences participatives en mettant à contribution des amateurs. « *L'examen des écarts entre les résultats des amateurs et ceux des experts nous permet de caractériser la difficulté de nos tâches d'annotation et ainsi d'adapter le développement de nos outils en fonction.* »

En effet, le groupe souhaite proposer à terme des outils facilement utilisables et pouvant servir à la formation, entre autres, d'agents du Parc naturel marin d'Iroise et de l'OFB. Ainsi, OSmOSE favorisera une meilleure interaction entre les besoins des praticiens de l'écologie et les progrès de la recherche.

laboratoire Lab-STICC (pôle IA et océan)
flore.samaran@ensta-bretagne.fr
dorian.cazau@ensta-bretagne.fr



Les 7 points d'écoute (hydrophones et enregistrements) qui composent l'observatoire sont récupérés et remplacés tous les 3 mois.



Spectrogramme



L'observatoire Cetiroise est conduit avec le soutien financier de France Relance, de l'Office français de la biodiversité et d'ENSTA Bretagne, dans le cadre du plan de relance.

¹ Open Science meets the Ocean Sound Explorers. Projet subventionné par l'OFB.

² Représentation 2D de l'intensité d'un son en fonction de la fréquence et du temps.

DES ROBOTS SOUS-MARINS BIEN CÂBLÉS

Christophe Viel a réalisé son rêve d'enfant : faire de la recherche en robotique marine. Depuis 2021 il est affecté par le CNRS à l'ENSTA Bretagne, dans l'équipe ROBEX (robotique d'exploration) du laboratoire Lab-STICC.

Ce domaine de recherche en plein essor est à la fois exigeant sur le plan théorique et stimulant sur le plan applicatif. De nombreuses campagnes d'essais en mer ou sur lac sont menées.

Docteur depuis 2014 après une thèse sur les flottes de robots, ses recherches ciblent les systèmes de drones sous-marins câblés. Ces ROV* sont couramment utilisés pour de l'inspection ou de la maintenance. Ils sont reliés par câble à la surface (plateforme, quai ou navire) afin de transmettre de la vidéo à un opérateur : « *le drone est à la fois les yeux et les mains de l'opérateur* ».

Mais les mouvements aléatoires du câble gênent les missions car ils finissent le plus souvent par s'emmêler. La solution ? des poulies et des masses pour lester le câble. Et les angles du câble mesurés depuis la surface et le ROV renseignent sur la localisation du robot.

Un article a été publié dans Ocean Engineer fin 2022 et un autre est sur le point de l'être. Christophe s'intéresse également aux flottes de robots qui décupleraient les capacités d'intervention ou d'inspection. Les problèmes posés gagnent en complexité.

“

la construction imminente du nouveau bassin de robotique, qui sera inauguré en 2024, va décupler ces capacités



**RECHERCHE
ROBOTIQUE
INGÉNIERIE_MARINE
LABSTICC
EQUIPE_ROBEX**



2 CHERCHEURS EN CONNAISSANCE ET OBSERVATION DE L'ENVIRONNEMENT OBTIENNENT LA "HDR"

LE RANG LE PLUS ÉLEVÉ DE LA RECHERCHE EN FRANCE

Leurs disciplines pourront paraître très abstraites aux non spécialistes. L'intérêt technologique et les applications de leurs recherches répondent pourtant à des applications très concrètes et des besoins importants de connaissance et d'observation de l'environnement, notamment marin.

Angélique Drémeau et Arnaud Coatanhay se sont distingués en présentant leurs parcours et productions scientifiques à l'habilitation à diriger des recherches, le titre universitaire le plus élevé en France. Recevant les félicitations de leurs pairs et de leurs collègues, l'obtention de leur HDR récompense des parcours scientifiques à la fois originaux et de grand intérêt pour l'industrie et la société, Angélique sur les méthodes de traitement de signal, avec un volet acoustique marine très développé (sonars), Arnaud en modélisation des phénomènes physiques de propagation des signaux électromagnétiques (radars).

Depuis leur arrivée à l'ENSTA Bretagne, Angélique Drémeau et Arnaud Coatanhay ont orienté leurs recherches sur l'observation de l'environnement. Leurs disciplines et les systèmes d'observation auxquels elles s'appliquent sont bien différents et très complémentaires, notamment pour la description de l'environnement marin et sous-marin.



Arnaud Coatanhay
Laboratoire
Lab-STICC,
équipe SyPH



Les travaux d'Arnaud portent sur l'amélioration des techniques de télédétection radar. Ses contributions sur la modélisation de la diffusion et de l'interaction d'ondes électromagnétiques impactant des surfaces de mer ont à ce titre prouvé leur intérêt.

"L'HDR a été pour moi un jalon, l'occasion de faire le bilan et de réfléchir à de nouvelles perspectives de recherche. Depuis quelques années, je me suis beaucoup intéressé à l'apport de l'information quantique dans la télédétection électromagnétique!", s'enthousiasme Arnaud Coatanhay.

Quant à Angélique, ses travaux sur les approximations variationnelles bayésiennes, fil conducteur de ses recherches, ont prouvé leur intérêt en acoustique sous-marine.

"Le cadre bayésien (méthode mathématique) est parfait pour modéliser les fluctuations aléatoires du milieu océanique et les intégrer ensuite dans des procédures de localisation de sources par exemple", précise la chercheuse.

Cette distinction révèle la qualité du parcours scientifique accompli ainsi que la ténacité et l'envie d'apprendre et de transmettre dont ils font preuve.

Angélique Drémeau
Laboratoire
Lab-STICC,
équipe DMID





PROJET SYDACICO : OPTIMISER LES COMMUNICATIONS AÉRIENNES AIR-AIR ET AIR-SOL.

L'objectif de l'étude est de modéliser, simuler et optimiser les canaux physiques de communication (de l'émetteur au récepteur) de drones aériens, en tenant compte des contextes opérationnels.



Cette étude est en fait le second volet d'un vaste programme de recherche commandé par la DGA, qui vise l'optimisation de la qualité des communications entre un drone aérien et son opérateur basé à terre, ou entre plusieurs drones et leur opérateur. Pour cela, les outils de calcul des missions et de pilotage des drones devront tenir compte des contextes opérationnels, en particulier les éléments naturels comme le relief ou la végétation dense qui limitent la propagation des ondes.

La 1^{re} étude avait permis de modéliser ce coefficient de perte de communication. Cette nouvelle étude a plusieurs objectifs complémentaires.

Tout d'abord trouver les meilleures routes, celles qui permettent de conserver un coefficient de communication le plus élevé possible. Pour cela les chercheurs développent des techniques d'optimisation efficaces intégrant les modèles de propagation des ondes radar (théories mathéma-

tiques d'optimisation).

Autres paramètres pris en compte, la gestion du vol et l'orientation du drone. Elles impactent également les communications radiofréquences et sont prises en compte dans les modèles à l'aide d'algorithmes d'IA (apprentissage par renforcement). Enfin, des méthodes de calcul des missions pourront faire intervenir deux ou plusieurs drones afin d'assurer cette optimisation des communications. Les chercheurs étudient alors dans quelle mesure les algorithmes développés sont capables de faire face à une grande montée de la complexité combinatoire inhérente au contexte multi-drones.

*laboratoire Lab-STICC / équipe SI3
ali.mansour@ensta-bretagne.fr*

PROJET ONEWAY : CAPACITÉS DE MODÉLISATION ET ANALYSE NUMÉRIQUE D'UN PLAN DE DÉVELOPPEMENT PRODUIT (PDP) POUR L'INDUSTRIE AÉRONAUTIQUE

L'équipe P4S d'ENSTA Bretagne (laboratoire Lab-STICC) s'intéresse aux méthodes et outils pour spécifier et décrire des systèmes et des logiciels, dans le but d'évaluer et d'analyser leurs performances et ainsi augmenter la confiance des utilisateurs et garantir la sûreté de fonctionnement.

Dans le cadre du projet "Oneway", mené en 2021-2022 avec 13 autres partenaires, ces expertises ont été appliquées à l'amélioration des cycles de conception et de développement de produits aéronautiques. Elles ont permis d'engager la transformation radicale des méthodes d'ingénierie.

L'équipe ENSTA Bretagne était en charge de la définition d'une capacité numérique d'aide à la décision de lancement, de contrôle et de pilotage d'un Plan de Développement Produit (PDP). Le PDP

cherche à prédire et maîtriser la date de maturité du produit et de son système industriel permettant son entrée sur le marché, mais aussi à dater la phase de montée en cadence de production. De tels outils et méthodes de modélisation sont devenus vitaux pour assurer la compétitivité des entreprises.

L'expérience de l'équipe P4S à l'ENSTA Bretagne sur les problématiques de fédération de systèmes logiciels complexes, le développement de sémantique formelle et d'algorithmes d'analyse ont permis le développement d'un cadre de modélisation PDP outillé.

L'outil développé permet une fine capture des spécificités métier, la simulation à échelle industrielle du processus de développement, et la validation des modèles construits à travers des preuves formelles.



*laboratoire Lab-STICC / équipe P4S
ciprian.teodorov@ensta-bretagne.fr*



ASSURER LA CYBERSÉCURITÉ D'UNE MEUTE DE DRONES MARINS

Exploration minière, surveillance portuaire ou côtière... Ces activités sont de plus en plus souvent assurées par des meutes de drones pilotées de façon semi-automatique. Seulement, la complexité de leurs réseaux les rend vulnérables aux cyberattaques.

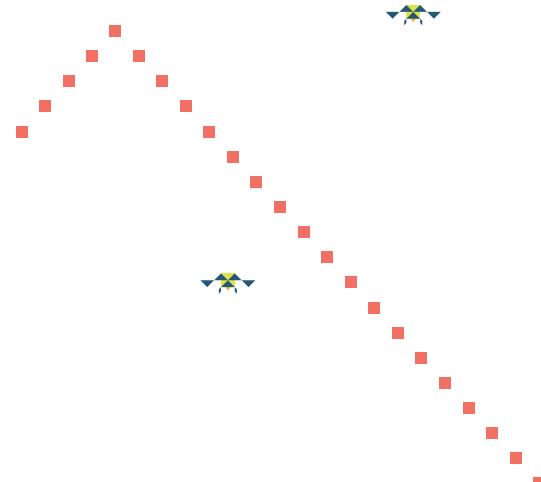
Afin d'assurer la sécurité des données contenues et transmises entre drones, l'équipe «*Interactions logiciels, matériel et environnement*» (Shaker) d'ENSTA Bretagne et du Lab-STICC, a lancé en septembre 2022 le projet DISPEED¹ avec l'AID. Son objectif ? **«Mettre au point un système de détection des intrusions (IDS) qui prend en compte les ressources dont dispose chacun des drones de la meute en termes de capacité de calcul et d'énergie»**, présente Camélia Slimani, post-doctorante à l'ENSTA Bretagne et membre de l'équipe.

Les IDSs les plus répandus reposent sur des algorithmes de machine learning qui requièrent une puissance de calcul et de mémorisation importante. Or tous les types de drones ne disposent pas des mêmes capacités de traitement (processeurs, mémoires, stockage), ce qui affecte leur performance

en matière de cybersécurité. **«Tout l'enjeu est de proposer un modèle d'exécution qui fournisse un compromis pertinent entre rapidité de détection et consommation énergétique en fonction de la criticité de l'attaque et de l'état du système et de la mission»**, précise la chercheuse.

Dans un premier temps, l'équipe de recherche réalise une étude de performance et de consommation énergétique de plusieurs IDSs existants avant d'établir une stratégie d'exécution qui s'adapte aux missions choisies pour une population de drones évoluant en toute autonomie.

*laboratoire Lab-STICC / équipe Shaker
jalil.boukhobza@ensta-bretagne.fr
camelia.slimani@ensta-bretagne.fr*



TRUSTGW, SÉCURISER L'INDUSTRIE 4.0

Les usines possèdent de plus en plus d'objets connectés (capteurs, actionneurs...) qui assurent en temps réel une veille sur le bon fonctionnement des machines en production. Les données collectées par ces objets sont ensuite envoyées à une machine informatique, appelée gateway, qui est capable de les analyser et de détecter d'éventuelles anomalies. L'ensemble de ce système permet d'assurer une maintenance prédictive. Seulement, la communication entre cette passerelle et les objets est vulnérable. En effet, le transfert des données entre les objets commandables à distance et la gateway se fait au moyen de réseaux sans fil (wifi, bluetooth) qui peuvent être sujets aux cyberattaques.

Des technologies innovantes

Afin d'assurer le bon fonctionnement d'une usine, le projet national TrustGW a été lancé en 2021. Il regroupe ENSTA Bretagne, l'université Bretagne Sud, Irisa Rennes et IETR Rennes. Son objectif ? Mettre en place une solution de cybersécurité afin de protéger les données à la fois lors de leur collecte par l'objet connecté, lors de leur transfert à la gateway et de leur analyse.

«L'originalité du projet est de développer une gateway reconfigurable et capable de traiter rapidement un très grand nombre de données

issues de plusieurs capteurs utilisant des réseaux sans fil différents (wifi, bluetooth...)», explique Pascal Cotret, maître de conférences au lab-STICC et chargé de développer un prototype à destination des industriels. Pour cela, les chercheurs utilisent notamment des composants électroniques FPGA, utilisés pour exécuter rapidement des algorithmes de chiffrement et de sécurisation des données sur des processeurs open-source RISC-V. Ils sont également moins vulnérables aux cyberattaques car reprogrammables au cours du temps.

«Pour sécuriser davantage les données de la gateway, nous les cloisonnons selon leurs caractéristiques, en séparant par exemple celles issues d'objets connectés en bluetooth de ceux connectés en wifi.»

Les technologies développées au sein du projet TrustGW intéressent déjà de nombreux industriels, que ce soit pour la modernisation d'installations industrielles déjà existantes ou l'installation de nouveaux réseaux protégés au sein de leurs futures usines.

*laboratoire Lab-STICC / équipe Arcad
pascal.cotret@ensta-bretagne.fr*

“
**Aujourd'hui,
le monde est
de plus en plus
connecté.
Et l'industrie n'y
fait pas exception.**

¹ Projet « Détection d'Intrusion et compromis Sécurité / Performance / Energie, Etude pour les meutes de Drones » financé par l'Agence Innovation Défense du ministère des armées.

SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

PROJET SCIENTIFIQUE DU LABORATOIRE FOAP

Multi tutelles et inter-régional, FoAP est le seul laboratoire dédié à la formation professionnelle et à la formation des adultes en France. Il anime un réseau de chercheurs sur les questions de la formation au sens large : formation professionnelle initiale, enseignement supérieur, formation tout au long de la vie, apprentissages dans l'activité, parcours personnels et professionnels.

TROIS AXES THÉMATIQUES COMPOSENT
LE PROJET SCIENTIFIQUE DU LABORATOIRE :



Conception de formations,
circulation des savoirs et
compétences des apprenants



Curriculum
et dynamiques
identitaires



Espaces d'action
et apprentissages
professionnels.

FORMER À L'INNOVATION RESPONSABLE ET AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

A l'ENSTA Bretagne, l'équipe de recherche « Formation et Professionnalisation des ingénieurs » (FPI) se consacre plus particulièrement aux ingénieurs, notamment sous l'angle de la formation à l'innovation responsable et au développement durable, objet de la thèse de Mantoura Nakad.

Co-encadrée par l'université de Balamand au Liban, Mantoura entend contribuer à une meilleure compréhension des transformations en cours dans les formations d'ingénieurs au Liban. L'éducation au développement durable requiert des réponses pédagogiques et des changements de paradigmes incluant à

la fois les programmes et toute l'organisation des établissements d'enseignement supérieur. Sa thèse proposera des clés de compréhension, des pistes de réflexion et d'action sur ce postulat, après une enquête qualitative et quantitative menée dans plusieurs universités libanaises.

1
thèse
débutée
en 2022

L'INNOVATION DANS LES ARMÉES

Le projet TRAVID (Travail vivant d'innovation de défense) a été coordonné par Jean Frances enseignant-chercheur en sociologie à l'ENSTA Bretagne. Les enquêtes et analyses ont été réalisées avec Violette Larrieu, postdoctorante dans l'équipe, et Damien Coadour, également enseignant-chercheur à l'ENSTA Bretagne.

Violette : « Nous avons choisi d'étudier comment les militaires s'impliquent dans l'innovation. Ces innovations élaborées « par et pour » les militaires s'appuient sur leurs propres expériences. Elles concernent souvent leurs équipements et armements afin d'améliorer leurs conditions de travail et leur efficacité en mission. Nous avons concentré nos recherches sur les Forces Spéciales en nous déplaçant dans plusieurs Unités en France, en retraçant la trajectoire de ces innovations, de l'idéation au « passage à l'échelle », en passant par le prototypage et la certification. Le rapport rédigé pour le compte de l'AID fait état de ce travail d'innovation par et pour les opérationnels et propose diverses recommandations susceptibles d'en améliorer les conditions »

Y AURA T'IL UNE SUITE ?

Jean : « Un autre projet de recherche I2DI (Innovation de défense, défense de l'innovation) débute en 2023. Si le projet TRAVID relevait avant tout de la sociologie celui-ci s'intègre davantage dans le champ des Sciences Politiques.

Notre objectif est de comprendre, comment l'innovation est devenue un objet de politique publique et comment elle est pensée. Cela passe par l'analyse des dispositifs mis en place par le Ministère des Armées pour encourager l'innovation. À terme, l'idée est de croiser l'approche par le haut avec l'approche par le terrain »

Laboratoire FoAP (équipe FPI)
jean.frances@ensta-bretagne.fr
violette.larrieu@ensta-bretagne.fr
damien.coadour@ensta-bratgne.fr



Sur la base de ces recherches, Violette Larrieu est lauréate de la Fondation pour les Sciences Sociales (promotion 2023-2024).

Directrice
de publication :
Ingrid Le Toutouze
Equipe de rédaction :
Ingrid Le Toutouze,
Nadège Le Clainche,
Marie Hilary

Mise en page : agence Coqueliko
Impression : Cloître imprimeur
Date de publication : juin 2023

LES DIPLÔMÉS 2022

DE LA PROMOTION

HENRI-GERMAIN DELAUZE



Le Président de VALEO, Jacques Aschenbroich, parraine la promotion 2023



voir la vidéo de
la cérémonie du
Palmarès 2022

ensta-bretagne.fr

