



# RECHERCHE

L'année 2021 a été importante pour dresser un panorama quantitatif et qualitatif de la recherche menée à l'ENSTA Bretagne, notamment au travers de l'évaluation HCERES<sup>[1]</sup> de deux de ses trois laboratoires, et tracer des perspectives dans le cadre de l'élaboration de la stratégie de développement 2022-2026.

L'évaluation de la recherche de l'école a démarré en 2021 par l'évaluation globale de l'ENSTA Bretagne selon le référentiel de la section Etablissement de l'HCERES. La croissance et le dynamisme de la recherche depuis cinq ans ont été soulignés par les experts qui nous ont évalués :

- sa bonne intégration dans des unités multi-établissements,
- une production académique très satisfaisante,
- une capacité à tisser des liens avec les acteurs socio-économiques.

L'évaluation s'est poursuivie au printemps dans les laboratoires IRDL et LabSTICC, qui ont donné lieu, là-aussi, à des rapports particulièrement intéressants. La qualité et la quantité des travaux scientifiques menés ont été salués par les comités. Les pistes de développement sont également bien identifiées. Pour l'IRDL, il est important d'accroître les actions à l'interna-

tional. Pour le LabSTICC, l'effort sur la gouvernance et le pilotage scientifique doit être poursuivi.

Enfin, le projet de création d'une Ecole Doctorale en co-accreditation (IMT Atlantique, ENSTA Bretagne) a été évalué positivement par le comité HCERES qui a noté l'effort consacré par les deux établissements à renforcer l'interdisciplinarité et le lien avec le monde socio-économique.

Toutes ses évaluations externes à l'ENSTA Bretagne ont été utiles pour guider l'élaboration des orientations de la stratégie de recherche 2022-2026 proposée au ministère des Armées.

La politique de recherche a plusieurs ambitions, en particulier celles de servir les besoins de la défense, de l'industrie et de la société, pour une avenir durable.

Certaines de ces ambitions s'inscrivent dans la continuité de la politique de recherche actuelle : participation à des unités de recherche multi-tutelle, positionnement sur des applications au service de la défense, de la sécurité, de la performance industrielle, avec une coloration maritime affirmée.

D'autres thèmes font l'objet d'une inflexion significative. Ainsi, la place du doctorat, y compris dans le cadre de la formation des élèves ingénieurs, sera renforcée. Une réflexion pour accroître la dimension internationale des activités de recherche sera également menée. Enfin, les enjeux du développement durable et de la responsabilité sociétale seront pleinement intégrés dans la politique de recherche de l'école.

Les pages suivantes décrivent les thématiques de recherche des laboratoires et les illustrent par un certain nombre de programmes menés en 2021.

[1] Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur

## SCIENCES HUMAINES ET SOCIALES

FoAP UR 7529  
> page 44

## SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

Lab-STICC  
UMR CNRS 6285  
> page 36

## SCIENCES MÉCANIQUES

IRD  
UMR CNRS 6027  
> page 30

## EFFECTIF RECHERCHE

**268**  
PERSONNELS  
ET DOCTORANTS



**Yann Doutreleau**  
Directeur scientifique

**121**  
THÈSES en cours,  
soutenues et débutées


**13,7 M€**  
DE CONTRATS  
notifiés en 2021

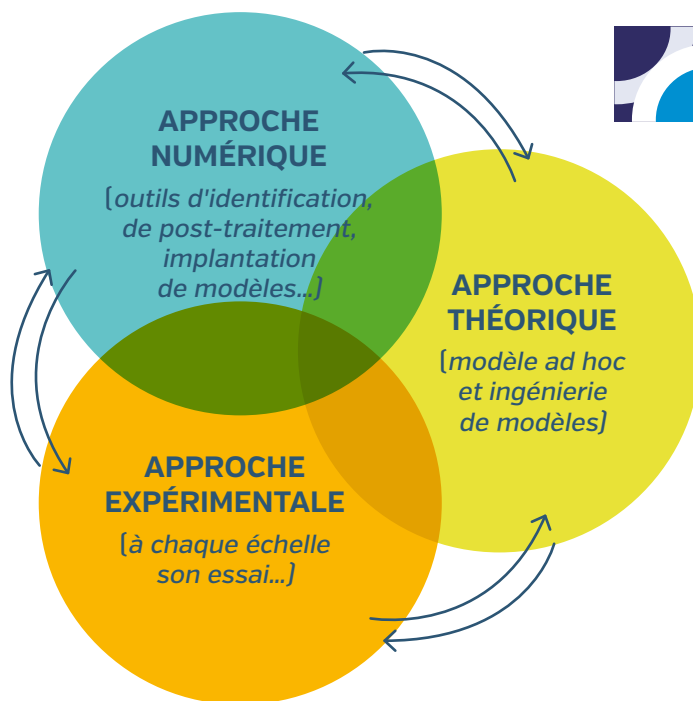
**150**  
PUBLICATIONS  
et communications  
en conférences

Institut  
de Recherche  
Dupuy de Lôme  
UMR CNRS 6027  
institut Carnot ARTS

# IRDL / SCIENCES MÉCANIQUES

## FICHE D'IDENTITÉ

- Créé le 1<sup>er</sup> janvier 2016, l'IRDL est un laboratoire d'excellence d'envergure nationale et internationale en sciences mécaniques.
- Il fédère les équipes de recherche de 2 universités et 2 grandes écoles : **UBS, UBO, ENSTA Bretagne et ENIB.**
- C'est une unité mixte de recherche du CNRS et des 4 établissements pré-cités [UMR 6027], rattachée à l'INSIS.
- **325** membres, dont 125 doctorants.
- Environ **240** publications dans des revues internationales à comité de lecture/an.
- **Le 1<sup>er</sup> laboratoire breton en proportion et volume de thèses associant l'industrie** [cf. rapport DRRT 2018 : 30 % de doctorants sous contrat CIFRE<sup>2</sup> avec une entreprise]
-  **irdl.fr**



**ENSTA Bretagne  
est le 2<sup>e</sup> contributeur  
de l'IRDL. "**



**35**  
PUBLICATIONS



**48**  
THÈSES ENCADRÉES



**7,08 M€**  
DE CONTRATS  
NOTIFIÉS

## PROJET SCIENTIFIQUE DE L'IRDL

Ingénierie des matériaux et des systèmes mécaniques. L'IRDL est apprécié pour son projet scientifique original et ambitieux, le bon équilibre entre études amont et appliquées, les nombreuses interactions avec les entreprises et la qualité de la formation par la recherche.

L'UMR est organisée en **5 Pôles Thématiques de Recherche** :

- PTR1 : Composites, nanocomposites, biocomposites.
- PTR2 : Assemblages multi-matériaux.
- PTR3 : Structures, fluides et interactions.
- PTR4 : Systèmes énergétiques et procédés thermiques.
- PTR5 : Comportement et durabilité des matériaux hétérogènes.

ENSTA Bretagne contribue principalement aux pôles 2, 3 et 5, et à moindre échelle au pôle 1.

**3 axes transversaux**, rattachés chacun à un domaine industriel, sont privilégiés et confèrent à l'IRDL son positionnement original en France.

- MER : construction navale, offshore, EMR.
- TRANSPORT : automobile, aéronautique.
- DÉFENSE : naval, terrestre.

## CONTACT

Nicolas CARRERE  
Directeur adjoint de l'IRDL  
nicolas.carrere@ensta-bretagne.fr  
T. +33 (0)2 98 34 59 13

## RECHERCHE



Début des travaux de recherche sur la fatigue à très grand nombre de cycle (VHCF). L'acquisition en 2021 d'une machine de fatigue gigacyclique très haute fréquence (20kHz) permet des mesures sous sollicitation à 100 milliards de cycles en seulement 14h. Cet équipement répond aux besoins expérimentaux de la chaire Self-Heating qui contribue à élargissement significativement le périmètre d'étude du laboratoire IRDL.

## TEMPS FORTS DE L'ANNÉE 2021

### EVALUATION HCERES

Nicolas Carrere, enseignant-chercheur  
ENSTA Bretagne, directeur adjoint de l'IRDL :

« C'est le lien fort avec le tissu industriel national, la production scientifique élevée, la complémentarité forte des équipes et l'unité du laboratoire qui constituent les points forts de l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme, comme l'a souligné le Haut conseil d'évaluation Hcéres\* dans son rapport publié en 2021. Notre projet stratégique a convaincu. Les synergies entre les différents sites bretons où sont localisées les équipes sont bien en place. L'un des axes de développement sur lequel nous mettons l'accent est le rayonnement international plus fort du laboratoire ».

- Les recherches conduites par le laboratoire ont bénéficié à près de 200 entreprises industrielles ces 6 dernières années (grands groupes, PME et TPE).
- Les recherches concernent au 2/3 des applications civiles ou duales et pour 1/3 la défense (en valeur des contrats).



### « SELF HEATING » : CHAIRE INDUSTRIELLE

ANR avec SAFRAN<sup>1</sup>,  
NAVAL GROUP, IRDL<sup>2</sup>  
et l'institut P<sup>1</sup>

Créée fin 2020, c'est la 1<sup>re</sup> chaire industrielle de recherche de Bretagne co-financée par l'Agence Nationale de la Recherche [ANR].

Elle porte sur la caractérisation rapide des propriétés en fatigue de différents matériaux et assemblages soumis à de très grands nombres de cycles. La méthode, qui s'appuie sur la mesure de leur auto-échauffement (self heating), donne son nom à la chaire et permet de disposer beaucoup plus rapidement des résultats.

L'objectif des industriels est de prédire la tenue en service de ces matériaux et assemblages pour les utiliser dans les bons contextes et ainsi optimiser le dimensionnement des structures, navales et aériennes.

Pilote : Sylvain Calloch, Pr. ENSTA Bretagne / IRDL

- Budget pour 4 ans : 2,05 M€ (50% de l'ANR et 50% de l'industrie)
- Une équipe de 25 chercheurs :  
8 thèses, 4 post-doc et 13 chercheurs encadrants

### LABO COMMUN « GUSTAVE ZÉDÉ »

ENSTA Bretagne-IRDL,  
NAVAL GROUP

Créé en 2015, ce dispositif conjoint de R&D permet de développer des outils innovants d'aide au dimensionnement des structures navales sous sollicitations extrêmes.

+ d'infos [page 35](#)

### LA PLATE-FORME TECHNOLOGIQUE MASMECA

Elle occupe 1200 m<sup>2</sup> du centre de recherche ENSTA Bretagne auxquels s'ajoutent 300 m<sup>2</sup> à l'Enib.

Ses nombreux moyens expérimentaux visent à caractériser, à plusieurs échelles, les propriétés mécaniques de tous types de matériaux, assemblages et structures, étudiés par le laboratoire IRDL.

5 plateaux techniques :

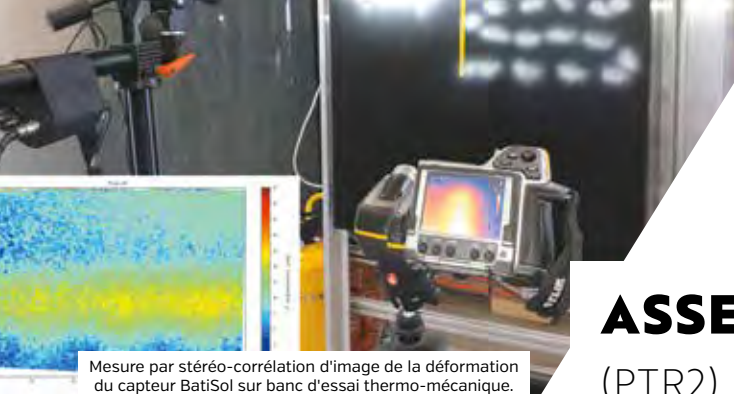
- Caractérisation dynamique (essais à haute vitesse de sollicitation)
- Caractérisation thermo-mécanique (sollicitations sous conditions mécaniques et d'environnement contrôlées)
- Caractérisation physico-chimique (évaluer l'effet de la microstructure sur le comportement mécanique des matériaux)
- Mesures et observations
- Prototypage

+ d'infos : [masmeca.ensta-bretagne.fr](http://masmeca.ensta-bretagne.fr)

[www.ensta-bretagne.fr/plate-forme-technologique-masmeca-0](http://www.ensta-bretagne.fr/plate-forme-technologique-masmeca-0)

[1] Safran Aircraft Engines, Safran Landing Systems et Safran Composite. [2] site ENSTA Bretagne





Mesure par stéréo-corrélation d'image de la déformation du capteur BatiSol sur banc d'essai thermo-mécanique.

# ASSEMBLAGES MULTI-MATÉRIAUX

(PTR2)

#

# assemblage # collage # soudage  
 # frittage # fabrication additive  
 # multi-matériaux

23 PERSONNELS  
 dont 11 DOCTORANTS

14 PUBLICATIONS  
 dans des revues  
 à comité de lecture  
 et 1 chapitre d'ouvrage

## AXES DE RECHERCHE

Le pôle thématique de recherche « Assemblages multi-matériaux » de l'IRDL vise l'innovation dans les procédés d'assemblages, la caractérisation de leur tenue à long terme en environnements sévères et le développement de techniques hybrides.

- Étudier et optimiser les procédés d'assemblage, en assemblant des matériaux de différentes natures, munis de nouvelles préparations de surface.
- Instrumenter à cœur des assemblages (FGB, QRS, CIN...) et s'appuyer sur des dispositifs expérimentaux originaux ;
- Développer des outils de dimensionnement des assemblages collés et prendre en compte les paramètres liés aux procédés de collage.
- Caractériser la tenue à long terme des assemblages en environnement sévère.
- Développer des techniques hybrides (soudo-collage...) pour les structures multi-matériaux, afin d'atteindre des performances en termes de caractéristiques mécaniques.

## PROGRAMMES DE RECHERCHE

- **AM2** : Caractérisation thermique et mécanique d'assemblages multi-matériaux aluminium/acier pour automobiles (Financements Bpifrance, Stellantis)
- **COCOA** : Caractérisation et modélisation du comportement d'interface collées de forte épaisseur (financements Institut Carnot ARTS, Région Bretagne et Département Finistère)
- **ETACSI** : Développement d'un essai technologique en vue de valider la modélisation du comportement d'un adhésif sous sollicitation d'impact (financement SAFRAN Composites - collaboration avec PTR3)
- **CIBLES** : Développement d'un assemblage collé structurel multi-matériaux offrant une protection balistique (financement DGA, 2CA - collaboration avec PTR3)
- **DURECO** : Durabilité de réparations structurales collées (financement AID)
- **NABUCCO** : Modélisation analytique et numérique du flambement latéral de tubes offshore (Financement Région Bretagne)

## 1 THÈSE SOUTENUE EN 2021

- **Johnatan LEPLAT** (ANR France Energies Marines) : « Comportement mécanique et rupture de l'interface adhésif/substrat d'assemblages collés vieilliss en eau : caractérisation expérimentale et simulation numérique. »

## 3 NOUVELLES THÈSES

- **Pierre-Yves CORBEL** (bourses région Bretagne et ENSTA Bretagne) « Rupture des interfaces fibre/élastomère sous chargement complexe. »
- **Claudiu MALEA** (en co-tutelle avec l'Université de Pitesti - Roumanie) « Caractérisation expérimentale et modélisation numérique du procédé de fraisage par enlèvement de copeaux. »
- **Pierre FREQUELIN** (CIFRE Bayab en collaboration avec l'ICA) « Optimisation de la texturation de surface par Jet d'Eau Abrasif : application au collage de matériaux aéronautiques. »

## FOCUS

### COMPRENDRE ET PRÉDIRE LE COMPORTEMENT D'ADHÉSIFS DÉFORMABLES APPLIQUÉS EN FORTE ÉPAISSEUR

Les adhésifs à fort allongement utilisés sous forme de joints appliqués en forte épaisseur sont aujourd'hui utilisés pour assurer une fonction d'assemblage structural (ex : coque de navire, pale d'éolienne...). Ceci nécessite la mise en place de méthodes

de dimensionnement adaptées capables de prendre en compte la complexité de comportement de ces systèmes. Des outils originaux sont ainsi développés dans le cadre du projet collaboratif COCOA (Région Bretagne/ Carnot Arts) impliquant le LAMIH

(UMR CNRS 8201) et le CETIM. La modélisation de l'endommagement de l'interface collée est confrontée à des résultats d'essais de fissuration sous chargements complexes.

# STRUCTURES, FLUIDES & INTERACTIONS

(PTR3)

## AXES DE RECHERCHE

Les recherches portent sur les interactions fluide-structure, le comportement dynamique des matériaux et des structures et la détonique. Les applications concernent l'architecture navale, les énergies marines, la défense, l'aérospatial, ainsi que l'automobile et les procédés de fabrication.

- Hydrodynamique navale et étude de la réponse de structures en interaction avec des fluides.
- Caractérisation et modélisation de la réponse de matériaux et de structures, métalliques et composites, sous sollicitations dynamiques.
- Étude et modélisation des phénomènes d'impacts et d'explosions en milieux complexes.

## PROGRAMMES DE RECHERCHE

- **STADINAV** : Analyse probabiliste du roulis non linéaire des navires soumis à une houle irrégulière [Financement AID, en collaboration avec l'Ecole navale]. Ce projet a pour but de développer de nouvelles méthodes pour prédire le risque de chavirement des navires.
- **DIMPACT** : Dimensionnement d'éoliennes flottantes prenant en compte les impacts et le déferlement de vagues [Financement ANR / France Energies Marines]
- **OPTIFOIL** : Optimisation paramétrique des foils ; application à la voile Olympique [Financement Instituts Carnot ARTS et MERS, avec l'Ecole navale et Ifremer]
- **TRIBAL** : Protection composite transparent [Financement ANR ASTRID]
- **PROBALCAV** : Protection balistique cavitante [Financement ANR ASTRID Maturation]
- **SUSTAINED21** : Survivability of Structure Against Energy deposition [Financement ANR ASTRID]
- **MAPSEA** : MATériaux de Protection contre les effets de Souffle [Financement ANR]

## 7 THÈSES SOUTENUES EN 2021

- **Yann Richard** [DGA, Brest Métropole] : « Modélisation et étude des phénomènes de séparation et d'impact hydrodynamique secondaire lors du tossage des navires. »
- **Vincent Jaulin** [CIFRE CEA] : « Etude et modélisation d'impacts basses et haute vitesse sur des matériaux et structures de satellites. »
- **Jean-François Croteau** [Bourse européenne Québec] : « High velocity forming of superconducting structures with bulk Nb and Cu substrate. »
- **Camille Caisso** [CIFRE Livbag] : « Mise en place d'une méthodologie pour la caractérisation de la robustesse des générateurs de gaz pour airbags dans le domaine de la transition ductile-fragile. »

### DANS LE DOMAINE DES COMPOSITES :

- **Manel CHICHI** (cotutelle avec l'université de Sousse, Tunisie) : « Analyse des performances d'un nano-composite fonctionnel. »
- **Sabrina KHAMMASSI** (bourse région Bretagne) : « Nanotechnologie et réparation des structures composites endommagées. »
- **Amar MAZIZ** (cotutelle, programme algéro-français PROFAS B+) : « Analyse des défauts dans les pipes en matériaux composites. »

## FOCUS

### COBADI : CONCEPTION D'UN OUTIL DE DIMENSIONNEMENT DE BARRIÈRE DIPHASIQUE CONTRE LES EFFETS DES EXPLOSIONS

L'objectif principal du projet COBADI est le dimensionnement simple et rapide in situ d'une barrière de protection diphasique en fonction des paramètres de la menace (propriétés de l'onde de

souffle et des fragments hyper-véloces) et de la mousse liquide. L'étude vise à constituer une base de données expérimentales conséquente pour décrire le comportement des mousses sur

une large gamme de paramètres et être ainsi capables de concevoir une mousse optimisée pour une menace ciblée. mousse optimisée pour une menace ciblée.

#

# modélisation # simulation numérique # mécanique expérimentale # matériaux et structures # dynamique # chocs # impacts # interactions fluide-structure

26 PERSONNELS  
 dont 11 DOCTORANTS

11 articles  
 dans des revues  
 à comité de lecture



Mesure de température lors de tests de fatigue sur pièce issue de fabrication additive métallique

# COMPORTEMENT ET DURABILITÉ DES MATÉRIAUX HÉTÉROGÈNES (PTR5)

#

# fatigue # vieillissement # tenue en fatigue # modélisation # essais

28 PERSONNELS  
dont 15 DOCTORANTS10 PUBLICATIONS  
dans des revues  
à comité de lecture

## AXES DE RECHERCHE

Les recherches concernent le diagnostic, la mesure, la modélisation et la prévision de la santé des matériaux, des structures et des systèmes électromécaniques.

- Fatigue et auto-échauffement des matériaux et des structures (métaux, composites et matériaux organiques).
- Comportement et fatigue des matériaux actifs (matériaux piézo-électriques ou à mémoire de forme).
- Vieillesse thermique et marin des matériaux organiques.
- Comportement non-linéaire des matériaux hétérogènes.

Tout en répondant à des questions scientifiques fondamentales, ces recherches appliquées sont conduites avec les industriels européens, de nombreux secteurs, en particulier l'automobile, l'aéronautique, l'énergie ou les fournisseurs de matériaux.

## 4 THÈSES SOUTENUES EN 2021

- **Libor Navrátil** : « Investigation thermomécanique pour le dimensionnement en fatigue des composites tissés 3D pour applications aéronautiques » [CIFRE SAFRAN]
- **Lorenzo Bercelli** : « Dimensionnement à la fatigue de propulseurs en cupro aluminium obtenu par fabrication additive » [EA FRAPAN]
- **Amni Benhaz** : « Study of high cycle fatigue of metastable austenitic stainless steel at room and low temperatures via self-heating measurements » [ARED/ENIB]
- **Yoann Congard** : « Détermination de la durée de vie en fatigue LCF des instruments endodontiques en alliage à mémoire de forme » [CIFRE MICRO MEGA]

## 5 NOUVELLES THÈSES

- **Kilian Demilly** : « Influence d'un endommagement initial sur les propriétés à la fatigue des matériaux composites stratifiés UD : apport des mesures d'auto-échauffement pour évaluer la durée de vie résiduelle » [CIFRE Naval Group]
- **Pierrick Lepitre** : « Etude de l'influence de l'intégrité de surface et d'un revêtement sur les propriétés en fatigue à grand nombre de cycles de l'acier 300M à partir d'essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques » [CIFRE Safran Landing System]
- **Alexandre Ricker** : Simulative estimation of the heat build-up measurements throughout a thermo-mechanically coupled finite element [FE] analysis including nonlinear dissipative material model [Co-tutelle]
- **Théo Sevede** : « Etude et modélisation des propriétés en fatigue à très grand nombre de cycles et à hautes températures à partir d'essais d'auto échauffement sous sollicitations cycliques » [ANR chaire industrielle SELF-HEATING]
- **Sébastien Ballesio** : « Caractérisation et modélisation de la tenue à la fatigue et à la corrosion d'aciers duplex obtenus par fabrication additive SLM et LMD » [AID]

## FOCUS

### CARACTÉRISATION ET MODÉLISATION DE LA DURABILITÉ DE LIGNES D'ANCRAGE EN POLYAMIDE POUR LES ÉOLIENNES OFFSHORE FLOTTANTES

Les éoliennes flottantes sont placées sur des espaces maritimes où le potentiel d'énergie est jusqu'à quatre fois plus élevé que ceux choisis pour les éoliennes posées.

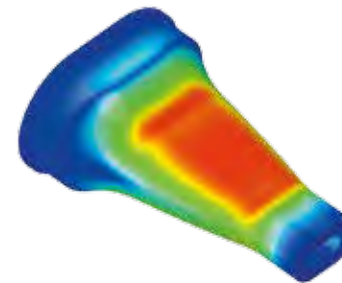
Les systèmes de flotteurs développés pour les positionnements en eaux peu profondes (< 200 m) requièrent un ancrage qui assure le maintien de la station et la diminution des effets combinés de la houle, du vent et des chargements dus à la plateforme. Le

choix de lignes d'ancrage en polyamide (PA6) s'impose face au polyester grâce à son importante capacité d'élongation avant rupture (>20 %). Combinée à leur résistance en traction, ces lignes permettraient le maintien et l'amortissement requis.

Le projet MONAMOOR, dans lequel s'inscrit la thèse de **Laure Civier**, s'intéresse au comportement à long terme [en fluage et fatigue] et à la durabilité de ces ancrages en polyamide. Le cœur

du travail comprend de la modélisation et de la caractérisation thermomécanique. L'objectif industriel est de développer une stratégie de monitoring pertinente et efficace. Des essais en mer permettront de valider les résultats de la thèse.

*Partenaires : France Energies Marines, ANR, Pôle mer Bretagne Atlantique, Ifremer, ENSTA Bretagne, universités de Nantes et Gustave Eiffel.*



Champ de contrainte en surface observé, sur une pièce creuse issue de fabrication additive, par thermométrie lors de la sollicitation en fatigue (flexion)

## LABORATOIRE COMMUN GUSTAVE ZÉDÉ

(NAVAL GROUP, ENSTA BRETAGNE)

### DURABILITÉ EN MER DES COMPOSITES STRATIFIÉS

Thèse de Kilian DEMILLY débutée mi-2021 dans le cadre de la Chaire industrielle ANR « Self-Heating »

Les matériaux composites à fibres continues ont montré leur intérêt notamment en mer où leur très bonne tenue à long terme et la diminution de la masse à rigidité constante représentent des atouts par rapport aux solutions métalliques. L'inconvénient majeur est le risque de délaminage, une rupture des interfaces entre les plis qui peut engendrer des fissures. Le délaminage peut être issu du procédé de fabrication ou faire suite à des sollicitations mécaniques dues à la forme de la structure ou aux impacts en mer. Les contrôles n'ayant pas une résolution suffisante pour détecter tous les délaminages, l'étude de la tenue en fatigue vise une planification des contrôles plus adaptée aux risques.

**Les travaux portent donc sur l'effet de défauts de type délaminage et/ou fissuration matricielle intrapli sur la tenue en fatigue de ces composites stratifiés. Des essais de fatigue seront menés sur 3 types d'éprouvettes : matériau sain (après fabrication), après impact et avec défaut artificiel (introduit lors de la fabrication).**

### TENUE EN FATIGUE DE LIGNES D'ARBRE DE TRANSMISSION DE NAVIRES

Thèse de Corentin GUELLEC débutée en janvier 2020 dans le cadre du projet INCOLA

Naval Group cherche à optimiser ses méthodes de dimensionnement d'axes de transmission utilisés sur bâtiments de surface et sous-marins. En service, ces structures tournantes sont soumises à des sollicitations fortement multiaxiales (flexion, efforts tranchants), très variables dans le temps (du fait des changements d'allure en navigation), giga-cycliques (~109 cycles) et intercalées avec les cycles de rotation d'arbre (~104 cycles).

**L'objectif de ces travaux est donc d'intégrer la multi-axialité et la variabilité du chargement dans un critère de vérification de la tenue en fatigue de ces structures.**

### TENUE EN FATIGUE DE PIÈCES CREUSES OBTENUES PAR FABRICATION ADDITIVE

Thèse de Lorenzo BERCELLI, soutenue en septembre 2021 dans le cadre du projet FRAPAN

Les procédés de fabrication additive sont une alternative prometteuse pour la production de pièces complexes à haute valeur ajoutée. Dans l'industrie navale, le procédé Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) est envisagé pour la fabrication de pales d'hélices creuses.

A cette fin l'industrie doit disposer de données fiables sur la tenue en fatigue à grand nombre de cycles des matériaux WAAM, en tenant compte des spécificités liées au procédé de fabrication.

**L'étude s'intéressait à l'influence des surfaces internes rugueuses (propres aux fabrications WAAM). Un essai de fatigue en flexion a été spécialement conçu et a permis de valider les modèles numériques de prédiction de la durabilité développés au laboratoire (photo).**

#

# valorisation # transfert  
# modélisation # caractérisation  
# fatigue # matériaux # assemblages  
# fabrication additive # acier  
# composites # naval



#### LABCOM "GUSTAVE ZÉDÉ"

- Créé en 2015 à l'ENSTA Bretagne, il s'appuie sur l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme (UMR CNRS).
- Ce dispositif conjoint de R&D permet de développer des outils innovants d'aide au dimensionnement des structures navales sous sollicitations extrêmes.
- Les recherches, expérimentales et de modélisation, visent la prévision de la tenue en fatigue.
- Différents programmes de recherche sont menés : FRAPAN, INCOLA, AMERICO, RAMSSES...

+ d'infos :  
[www.ensta-bretagne.fr/laboratoire-commun-gustave-zede](http://www.ensta-bretagne.fr/laboratoire-commun-gustave-zede)

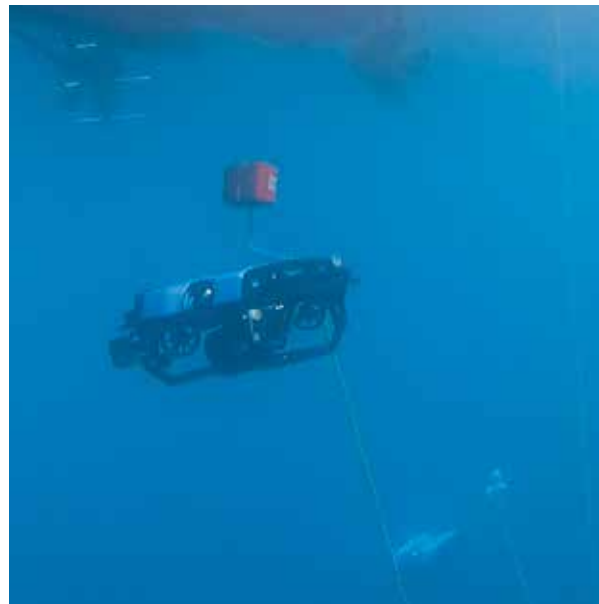
Laboratoire des Sciences  
et Techniques de  
l'Information, de  
la Communication et  
de la Connaissance  
UMR CNRS 6285

# LABORATOIRE LAB-STICC

## FICHE D'IDENTITÉ

- Le Lab-STICC est un laboratoire d'excellence multidisciplinaire, créé en 2008.
- **Sous la cotutelle du CNRS et de 5 établissements bretons**, il fédère les équipes de recherche en sciences et technologies de l'information et de la communication de 3 écoles d'ingénieurs et 2 universités : **IMT Atlantique, ENSTA Bretagne, ENIB, UBO et UBS.**
- Unité mixte de recherche 6285 du CNRS, le laboratoire est rattaché à l'INS2I en tant qu'institut principal et à l'INSIS en tant qu'institut secondaire.
- **631** membres, dont 236 doctorants.
- Environ **500** publications /an.
-  [www.labsticc.fr](http://www.labsticc.fr)

**ENSTA Bretagne  
est le 3<sup>e</sup> contributeur  
du Lab-STICC. "**



## PROJET SCIENTIFIQUE DU LAB-STICC

Du capteur à la connaissance :  
communiquer et décider.

Pôle de recherche fondamentale et appliquée, en forte interaction avec son environnement socio-économique, le Lab-STICC regroupe de multiples compétences de très haut niveau sur les systèmes numériques et communicants.

Son excellence et son importante production scientifique lui confèrent une solide visibilité.

Des programmes transverses répondent à des défis sociétaux d'innovation fortement interdisciplinaires, tels que :

- les dispositifs d'assistance aux personnes dépendantes.
- la cybersécurité et la cyberdéfense.
- le domaine STIC et Mer.
- les nouveaux modes de représentation et de traitement de l'information pour l'intelligence artificielle.
- les systèmes de drones.



**105**  
PUBLICATIONS

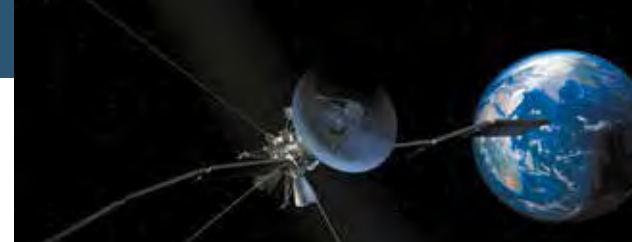


**52**  
THÈSES ENCADRÉES



**6,26 M€**  
DE CONTRATS  
NOTIFIÉS





## TEMPS FORTS DE L'ANNÉE 2021

### ÉVALUATION HCÉRES DE 2021



**Angélique Drémeau, enseignante-chercheuse ENSTA Bretagne, représentante du Lab-STICC à l'école :** « Le Haut Conseil de l'évaluation de la recherche et de l'enseignement supérieur a évalué le LAB-STICC en 2021.

Ce rendez-vous quinquennal s'est conclu sur un avis positif et quelques recommandations. Le Lab-STICC est jugé dynamique, avec une très bonne production scientifique, impressionnant par son spectre d'activités et considéré comme un véritable « atout » pour la région Bretagne. Sa visibilité internationale reste à consolider et la nouvelle organisation devrait l'y aider.»

[angelique.dremeau@ensta-bretagne.fr](mailto:angelique.dremeau@ensta-bretagne.fr)



## RECHERCHE PARTENARIALE ET INNOVATION

- **LE GIS CORMORANT** (groupement d'intérêt scientifique) créé par Thales avec la communauté scientifique de Bretagne occidentale, en particulier le Lab-STICC. Il intervient dans 3 domaines : capteurs et traitements intelligents, interaction homme-système et facteurs humains, autonomie des systèmes maritimes.
- **LE LABORATOIRE COMMUN SENI AVEC NAVAL GROUP** porte sur les systèmes embarqués navals intelligents, en particulier les systèmes d'acquisition d'informations et les processus de décision et d'action à bord des navires.
- **LA CHAIRE DE CYBERDÉFENSE DES SYSTÈMES NAVALS**, soutenue par la Marine Nationale, la région Bretagne et le Pôle d'excellence cyber, cible la protection des systèmes numériques et la détection des attaques cyber dans les systèmes maritimes.

Chaires Transnum et Oceanix,  
+ d'infos sur [www.ensta-bretagne.fr](http://www.ensta-bretagne.fr).

Dans la nouvelle organisation du laboratoire, les équipes de l'école contribuent à 10 des 25 équipes, au sein de 5 des 9 pôles.

### IA ET OCÉANS

Intelligence artificielle et Océans  
équipes M3, OSE et ROBEX

### DMID

Données, modèles, infos, décisions  
équipes Decide et Matrix

### SYPH

Systèmes photoniques & hyperfréquences  
équipe PIM

### T2I3

Traitement et transmission de l'information, algorithmes et intégration  
équipe SI3

### SHARP

Software and hardware, architectures and processes  
équipes P4S, ARCAD, SHAKER

## FOCUS

### NOUVELLES COOPÉRATIONS AVEC L'OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

Le suivi par acoustique passive est une discipline qui permet d'écouter, via des hydrophones, le paysage sonore sous-marin. A l'ENSTA Bretagne (UMR Lab-STICC), la petite équipe d'experts s'est déjà fait une belle place dans la communauté nationale et internationale. Plusieurs programmes de recherche sont conduits et deux nouveaux ont débuté fin 2021, dans le cadre du plan de relance, pour les besoins d'observation et de veille en mer de l'Office Français de la Biodiversité [OFB].

#### L'OBSERVATOIRE CETIROISE

Il s'agit de déployer un observatoire des cétacés durant une année dans le Parc naturel marin d'Iroise, afin d'identifier les espèces présentes et de mieux comprendre leurs répartitions saisonnières et spatiales.

- Printemps 2022 : mise à l'eau des enregistreurs
- Tous les trois mois, les données seront analysées : les plus petits cétacés émettent des sons de hautes fréquences tandis que les espèces les plus grandes émettent dans les basses fréquences.

Un projet financé par France relance, OFB et ENSTA Bretagne



**FLORE SAMARAN,**  
enseignante-chercheuse  
ENSTA Bretagne / Lab-STICC  
et responsable de ce projet :

"Ces dernières années, les observations de cétacés se sont multipliées sur les côtes bretonnes. Malheureusement, il s'agit d'observations visuelles

isolées, fortuites. Afin de préciser les espèces présentes et leur comportement, le suivi par acoustique passive représente une solution non intrusive idéale. »

Partenaires du projet : ENSTA Bretagne, l'Office Français de la Biodiversité (gestionnaire du parc marin), l'association Céladon, les agents du parc marin, la Division Technique (DT) de l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU, une unité d'appui à la recherche du CNRS) et Neotek.

Ce projet pourrait ensuite être déployé à plus large échelle dans le cadre de la Directive européenne Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM), qui prévoit que les pays membres renseignent l'état écologique de leur façade maritime. L'équipe ENSTA Bretagne a été missionnée à cette fin en tant qu'expert par l'OFB pour élaborer un programme de suivi des populations de mammifères marins dans les 4 régions marines de l'hexagone (Manche-Mer du Nord, Mer Celtique, Golfe de Gascogne, Méditerranée).

## JOURNÉES CLOUD 2021

Organisées à l'ENSTA Bretagne avec le CNRS, elles ont réuni 80 participants et porté sur le Cloud du futur : face à la croissance continue des besoins et des exigences fortes, comment améliorer ces dispositifs de stockage de données virtualisées ?



- #acoustique marine
- #acoustique passive
- #traitement de données marines
- #imagerie marine #machine learning
- #data science #big data
- #systèmes de capteurs
- #robotique mobile
- #autonomie #localisation
- #perception #contrôle

### 3 THÈSES SOUTENUES EN 2021

- **Auguste BOURGOIS**  
Équipe ROBEX [CIFRE FORSSEA] :  
« Amarrage collaboratif automatique et sécurisé d'un robot sur une plate-forme mobile. »
- **Joris TILLET**  
Équipe ROBEX [DGA, région Bretagne] :  
« petit poucet : localisation en environnement inconnu. »
- **Xiaomin WANG**  
Équipe ROBEX [avec OUC] : « Autonomous perception algorithms for a team of underwater robots: coordination strategy based on on-board cameras. »

## / PÔLE IA ET OCÉAN

### AXES DE RECHERCHE

**Le pôle « IA & Océan » se caractérise par une forte interdisciplinarité. L'environnement marin est pris en compte dans toute sa complexité afin de développer de nouvelles méthodes pour mieux l'explorer, le décrire, observer ses évolutions et y intervenir.**

Les recherches du pôle relèvent de l'IA appliquée à l'environnement marin, en interaction avec d'autres domaines scientifiques et technologiques comme les technologies offshore, l'observation spatiale, l'océanographie physique, l'hydrographie, l'écologie marine ou la surveillance maritime.

Le système complexe « océan » est considéré, comprenant l'étendue des interactions physiques, biologiques, écologiques et celles liées aux activités humaines (trafic maritime, aménagement du littoral, extraction des ressources marines,...).

36 PERSONELS  
dont 12 DOCTORANTS

34 PUBLICATIONS  
dont 27 articles  
et 7 communications  
en conférence

### APPLICATIONS

Connaissance de l'environnement marin, veille environnementale, conduite et sécurité des activités humaines en mer, aménagements maritimes et littoraux

### CONTACT

Pierre BOSSER  
pierre.bosser@ensta-bretagne.fr  
T. +33 [0]2 98 34 87 94

### TROIS ÉQUIPES SE COMPLÈTENT ET CONCOURENT AUX TROIS OBJECTIFS SCIENTIFIQUES DU PÔLE

	3 ÉQUIPES		
3 OBJECTIFS	M3 MARINE MAPPING & METROLOGY	OSE OBSERVATION, SIGNAL & ENVIRONNEMENT	ROBEX ROBOTIQUE POUR L'EXPLORATION
IA & PERCEPTION DE L'ENVIRONNEMENT MARIN	X	X	X
IA & DONNÉES OCÉANIQUES ET MARINES	X	X	
IA & ROBOTIQUE EXPLORATOIRE			X

## EQUIPE M3

### Marine Mapping & Metrology

L'équipe se focalise sur la compréhension de la physique de la mesure et de son exploitation pour une **représentation fiable et fidèle de l'environnement marin**.

[www.ensta-bretagne.fr/marine-mapping-metrology-m3](http://www.ensta-bretagne.fr/marine-mapping-metrology-m3)

## EQUIPE OSE

### Observation, Signal & Environnement

L'équipe mène des recherches méthodologiques en traitement du signal et IA appliquées à l'environnement marin, en mettant l'accent sur la **télé-détection multimodale** : images satellitaires, images aériennes, monitoring sous-marin...

- Reconstruction de dynamiques géophysiques à la surface de l'océan. Etude menée par apprentissage de solvers et à l'aide de modèles variationnels pour l'assimilation de données.
- Reconnaissance d'espèces de poissons dans des images vidéo sous-marines.

[www.ensta-bretagne.fr/equipe-observations-signal-environnement-ose](http://www.ensta-bretagne.fr/equipe-observations-signal-environnement-ose)

## EQUIPE ROBEX

### Robotique pour l'exploration

La robotique mobile vise ici la connaissance d'environnements inconnus comme les planètes lointaines, les grottes profondes, des zones irradiées, des veines d'eaux souterraines, les bâtiments en feu ou les fonds marins. L'humain peut difficilement intervenir de façon sécurisée. Les robots prennent le relai et doivent posséder un maximum d'autonomie et d'intelligence afin de pouvoir accomplir une mission : **en robotique exploratoire le robot doit cartographier son environnement, prendre des décisions, se localiser et être capable de revenir en parfaite autonomie**.

<https://www.ensta-bretagne.fr/equipe-robotique-dexploration-robex>

### FOCUS > M3

#### OBSERVER LE CLIMAT EN OCÉANS AUSTRAL ET INDIEN (PROJET MAP-IO)

Le but est de créer un observatoire du climat embarqué à bord du Marion Dufresne, navire océanographique français. L'une des composantes importantes est la mesure de l'humidité dans l'atmosphère. L'équipe apporte au consortium (14 partenaires) son expertise pour la mise au point du système de mesure. **Pierre BOSSER**, enseignant-chercheur : « Une antenne GNSS de haute précision est placée sur le pont du Marion Dufresne. Nous savons que le signal GNSS mesuré par l'antenne est perturbé entre autres par la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère. Avec les outils d'analyse mis au point nous en déduisons l'humidité atmosphérique à la verticale de l'antenne et cherchons maintenant à partager cette analyse en continue dans un délai suffisamment court pour alimenter les modèles de prévision météo. »

### FOCUS > M3

#### CARTOGRAPHIER LES PETITS FONDS MARINS AVEC DES DRONES AÉRIENS (PROJET CALHYB)

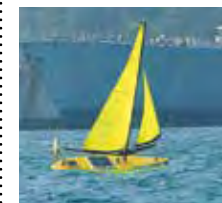


Les zones littorales de petits fonds sont sensibles aux changements climatiques, leur trait de côtes évolue et la surveillance de ces zones inondables requiert des mesures régulières et des systèmes de d'imagerie adaptés. C'est la vocation du projet de recherche CALHYB porté par Hytech-Imaging. **Guillaume SICOT**, enseignant chercheur : « Nous misons sur la fusion de données issues de deux capteurs. Il s'agit de tirer profit du niveau élevé de détails de l'imagerie spectrale (haute résolution) et de la justesse apportée par le profileur laser pour fiabiliser l'ensemble. L'enjeu du projet porte également sur l'intégration de ces capteurs sur un drone aérien en minimisant les contraintes de poids et de consommation d'énergie. »

### FOCUS > ROBEX

#### THÈSES EN ROBOTIQUE D'EXPLORATION APPLIQUÉES À L'ARCHÉO-ROBOTIQUE ET À L'INSPECTION DE STRUCTURES OFFSHORE

L'équipe ROBEX développe les outils méthodologiques qui permettent de concevoir l'intelligence de robots marins, capables d'accomplir des missions d'exploration ou d'intervention de façon parfaitement autonome, en sachant se diriger, se géolocaliser et adapter leur mission.



Parmi les nombreuses thèses soutenues ces dernières années, celles de **Joris TILLET** et **Auguste BOURGEOIS** contribuent à la mise au point de nouveaux systèmes robotiques autonomes.

- Joris a développé les algorithmes permettant à un robot autonome marin de tracter un magnétomètre et d'acquérir de la donnée parfaitement géolocalisée (travaux financés par des bourses DGA et région Bretagne). Le magnétomètre servant à détecter les pièces métalliques d'épaves enfouies dans les sédiments.
- En parallèle, les travaux d'Auguste ont porté sur le développement de méthodes et d'algorithmes pour la réalisation, en parfaite autonomie et sans dommages, de missions d'inspection et de maintenance de systèmes offshore par des robots sous-marins, permettant de minimiser les coûts de ces opérations.



Drones d'observation marin et sous-marin pour la cartographie autonome du lac de Guerlédan.

## DMID DONNÉES, MODÈLES, INFOS, DÉCISIONS

### AXES DE RECHERCHE

Le pôle DMID fait le lien entre les phénomènes, les comportements, les systèmes complexes, les données qui en découlent et la prise de décision.

Les chercheurs développent des approches guidées par les modèles mathématiques et statistiques. Ils sont organisés en 2 équipes :

- **MATRIX** : Modèles et Algorithmes pour le Traitement et l'Extraction de l'Information
- **DÉCIDE** : Aide à la Décision et Découverte de l'Information

### 2 THÈSES SOUTENUES EN 2021

- **Thomas PAVIET-SALOMON** [DGA] : « *Super résolution modale et discrimination à partir d'une antenne linéaire tractée.* »
- **Yoann SOLA** [DGA, Région Bretagne] : « *Contributions au développement de contrôleurs d'AUV basés sur de l'apprentissage par renforcement profond.* »

### FOCUS

#### PILOTAGE AUTONOME D'AUV EN COURANTS DE FORCE VARIABLE, AVEC NAVAL GROUP ET FLINDERS UNIVERSITY (ÉQUIPE MATRIX)

Pour leur pilotage autonome en milieu sous-marin les AUV\* doivent posséder des capacités d'adaptation et d'autonomie à long terme que l'équipe propose de résoudre en combinant l'automatique et l'IA et plus particulièrement le « deep reinforcement learnin » [apprentissage profond par renforcement]. Cette méthode allie les preuves formelles de stabilité et de sûreté de l'automatique aux capacités d'apprentissage du machine learning. Encadrés par une équipe associant Naval Group, Flinders University et ENSTA Bretagne, 3 thèses se concentrent sur ce sujet :

- La 1<sup>re</sup> thèse (**Yoann Sola**, soutenue en 2021) a montré l'intérêt en simulation de cette approche, tout en réduisant la consommation d'énergie.
- Une 2<sup>e</sup> thèse concerne l'adaptation aux courants marins des paramètres de la loi de commande appris par machine learning ainsi que le transfert de ce modèle appris en simulation à un AUV réel.
- Une 3<sup>e</sup> thèse débutera fin 2022 sur la détection et le pilotage en cas de défaillance interne à l'AUV.

## SYPH SYSTÈMES PHOTONIQUES & HYPERFRÉQUENCES



- #capteurs #radar #GNSS
- #propagation et interactions
- #fouillis #télé-détection
- #modélisation électromagnétique

16 PERSONNELS  
dont 5 DOCTORANTS

14 PUBLICATIONS

### APPLICATIONS

Observation de l'environnement, veille environnementale, défense, détection automatique de pollutions, sécurité des activités en mer, véhicules autonomes

### CONTACT

Ali KHENCHAF  
ali.khenchaf@ensta-bretagne.fr  
T. +33 [0]2 98 34 88 45

[www.ensta-bretagne.fr/pole-systemes-photoniques-hyperfréquences-syph](http://www.ensta-bretagne.fr/pole-systemes-photoniques-hyperfréquences-syph)



- #traitement du signal et de l'image
- #machine learning
- #automatique et systèmes dynamiques
- #optimisation

18 PERSONNELS  
dont 10 DOCTORANTS

9 PUBLICATIONS

### APPLICATIONS

Santé, surveillance de l'environnement marin, drones, positionnement de capteurs, métrologie de réseaux informatiques et détection d'anomalies.

### CONTACT

Gilles LE CHENADEC  
gilles.le\_chenadec@ensta-bretagne.fr  
T. +33 [0]2 98 34 87 43

[www.ensta-bretagne.fr/pole-donnees-modeles-infos-decisions-dmid](http://www.ensta-bretagne.fr/pole-donnees-modeles-infos-decisions-dmid)



## T213 TRAITEMENT ET TRANSMISSION DE L'INFORMATION, ALGORITHME ET INTÉGRATION

### AXES DE RECHERCHE / ÉQUIPE S13

A la frontière entre le traitement du signal, les mathématiques, la théorie de l'information classique et quantique, les recherches portent sur le volet « sécurité, intelligence et intégrité de l'information » [S13].

- L'équipe conçoit et développe des méthodes, algorithmes et solutions pour la sécurisation des communications et systèmes de transmission futurs.
- Ses contributions servent également à mettre à l'épreuve les systèmes déployés ou en réaliser le «reverse engineering» à destination de nos partenaires institutionnels de la défense ou des instances nationales de régulation.

### 3 THÈSES SOUTENUES EN 2021

- **Marwa IBRAHIM** [bourse libanaise] : « *Vers des Stratégies Efficaces de Collecte de Données et de Prise de Décision pour les Réseaux de Capteurs à Ressources Limitées.* »
- **Rida MORTADA** [bourse libanaise] : « *Energy Harvesting for cognitive radio.* »
- **Kahina BENSALIA** [bourse algérienne] : « *Séparation aveugle de sources ; appli-cation aux signaux bio-médicaux.* »

### FOCUS

#### RÉSEAUX DE CAPTEURS OPTIMISÉS (THÈSE DE MARWA IBRAHIM)

Le haut potentiel des capteurs est tempéré par deux freins technologiques majeurs : les ressources limitées de leurs batteries et la difficulté de collecte de données volumineuses en temps réel. Cette thèse propose plusieurs mécanismes de collecte et d'analyse de données pour surmonter ces défis, en se basant sur l'architecture en réseaux de capteurs (clustering).

Les résultats obtenus en expérimentations ont montré l'efficacité de ces mécanismes en termes de consommation d'énergie, de précision des données et de zone de couverture, et améliorent les performances des réseaux de capteurs.

### AXES DE RECHERCHE

Le thème central est l'optimisation des systèmes de communication, télécommunications, radar, guerre électronique, GNSS et télédétection.

Deux équipes composent ce pôle. L'équipe « **propagation et interactions multi-échelles** » (PIM) s'intéresse plus particulièrement à 3 thèmes complémentaires :

- Modélisation et simulation électromagnétique multi-échelle et multi-physique - en champs proche et lointain : outils, méthodes asymptotiques, méthodes exactes, méthodes empiriques, méthodes hybrides
- Modélisation et caractérisation du canal de propagation - méthodes physiques et statistiques
- Systèmes et plateformes / modélisation et simulation - systèmes expérimentaux et virtuels.

### FOCUS

#### DOREDO : DÉTECTION D'OBSTACLES PAR RADAR EMBARQUÉ SUR DRONE

Il s'agit de développer un système de détection et localisation d'objets, embarquable sur drone de moyenne endurance, afin de prévenir tout risque de collision potentielle avec d'autres aéronefs (avions légers, hélicoptères, drones de loisirs...). Le système permettrait un vol sécurisé de drones, aux caractéristiques comparables aux avions de ligne actuels, grâce au levé de verrous technologiques comme la miniaturisation et la robustesse face au fouillis sol ou ciel.

DOREDO est ainsi une première brique vers le vol de drones de moyenne endurance en espace non ségrégué\*.

\* un espace ségrégué est un couloir libre de tout autre trafic, réservé, déclaré et autorisé plusieurs jours à l'avance



#système de communication  
#traitement et protection  
de l'information #IA

15 PERSONNELS  
dont 9 DOCTORANTS

30 PUBLICATIONS

### APPLICATIONS

Communications tactiques  
(défense, spatial, sites sensibles...), drones, objets connectés, usine du futur, véhicules autonomes, santé

### CONTACT

Ali MANSOUR  
ali.mansour@ensta-bretagne.fr  
T. +33 (0)2 98 34 87 88

[www.ensta-bretagne.fr/pole-traitement-transmission-dinfo-algorithme-et-integration-t213](http://www.ensta-bretagne.fr/pole-traitement-transmission-dinfo-algorithme-et-integration-t213)



#

#sûreté #sécurité  
 #systèmes embarqués  
 #conception système  
 #virtualisation de circuit  
 #fédération de modèles  
 #vérification formelle  
 #stockage #Cloud #big\_data

### 3 THÈSES SOUTENUES EN 2021

- **Bastien DROUOT**  
Équipe P4S [région Bretagne, DGA] : « *Analyse de données de simulation pour le diagnostic.* »
- **Hannah BOENNING BADIER**  
Équipe SHARP [Pôle d'Excellence Cyber, région Bretagne] : « *Techniques d'obsfucation pour HLS en mode SAAS.* »
- **Mohammed BEY AHMED KHERNACHE**  
Équipe SHARP [FUI EFIGI] : « *Performance et efficacité énergétique du décodage des standards vidéo de nouvelle génération sur les architectures multi-cœurs basse consommation.* »

/ PÔLE SHARP

# SOFTWARE AND HARDWARE, ARCHITECTURES AND PROCESSES

## AXES DE RECHERCHE

Le pôle « SHARP » regroupe des compétences en électronique, informatique, automatique et traitement du signal. Les chercheurs créent des méthodes de conception d'architectures logicielles et électroniques pour la conception des systèmes embarqués, en assurant la fiabilité, la sûreté de fonctionnement et la cybersécurité de ces systèmes.

Les systèmes embarqués font partie d'un tout. Ce tout est un système de systèmes qui interagit avec son environnement et dont la complexité ne cesse de croître, en raison des nouvelles applications comme de l'IoT (objets connectés), des systèmes autonomes ou plus généralement des applications qui requièrent des moyens de calcul et de stockage importants (e.g. intelligence artificielle, big data).

Assurer les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles des systèmes embarqués (e.g. empreinte énergétique, sécurité, sûreté, comportement temporel) constitue un défi difficile auquel s'attache le pôle SHARP en étudiant les modèles, les méthodes et outils d'aide à la conception d'architectures pour ces nouveaux systèmes embarqués et leur environnement.

## TROIS ÉQUIPES QUI INTERAGISSENT ENTRE ELLES :

- **ARCAD** : Architectures matérielles et outils de CAO
- **SHAKER** : Interactions logiciel, matériel et environnement
- **P4S** : Processes for Safe and Secure Software and Systems



28 PERSONELS  
dont 16 DOCTORANTS

18 PUBLICATIONS  
dont 9 articles  
et 9 communications en  
conférence

## APPLICATIONS

Toutes les applications civiles et militaires comprenant des systèmes informatiques et électroniques devant être sécurisés et fiables

## CONTACTS

Ciprian TEODOROV  
ciprian.teodorov@ensta-bretagne.fr  
T. +33 (0)2 98 34 89 53

Jalil BOUKHOBZA  
jalil.boukhobza@ensta-bretagne.fr  
T. +33 (0)2 98 34 88 90

## FOCUS &gt; ARCAD



### PROTECTION CONTRE LE VOL DE PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE EN ÉLECTRONIQUE : TECHNIQUES D'OBFUSCATION DE CODE POUR LES CHAÎNES DE SYNTHÈSE HLS EN MODE SAAS

- Ce projet débuté fin 2017 est financé par la région Bretagne.
- Pilote : Jean-Christophe LE LANN, enseignant chercheur
- Partenaire : Politecnico di Milano [école polytechnique d'ingénieurs de Milan].
- Equipe de recherche : ARCAD [Architectures matérielles et outils de CAO]

#### Jean-Christophe Le Lann :

« La thèse d'Hannah BOENNING BADIER sur le sujet a exploré plusieurs pistes prometteuses en matière d'obfuscation [sécurité par l'obscurité], qui consiste à intégrer un « tatouage » discret dans un code informatique, à l'aide de techniques d'intelligence artificielle. »

La doctorante a également conçu des chevaux de Troie afin de mieux comprendre les implications de telles menaces matérielles et d'envisager des parades au moment de la conception.

Ces travaux originaux vont se poursuivre avec le soutien du Pôle d'Excellence Cyber. Ils intéressent la DGA et feront l'objet d'une seconde thèse.

## FOCUS &gt; P4S

### CRÉER LE CADRE UNIFICATEUR DU « SECURE BY DESIGN » POUR LA SPÉCIFICATION, FORMALISATION ET L'ANALYSE D'ARCHITECTURES MATÉRIELLES ET LOGICIELLES SÉCURISÉES

- Financé par l'AID et la DGA
- Pilote : Raúl MAZO PENA, enseignant chercheur
- Equipe de recherche : P4S [Processes for Safe and Secure Software and Systems]

La sécurité est passée du statut de sujet technique, généralement considéré par les concepteurs de systèmes à la fin des processus de conception ou de mise en œuvre, à celui de question critique, à aborder au plus tôt dans le cycle de conception.

Face à la multiplication des attaques sur les systèmes numériques le "Secure by Design" est une approche radicale et prometteuse. Cette méthode de développement consiste à intégrer les objectifs et paramètres de sécurisation des systèmes dès les premières étapes de conception.

L'ingénierie de la sécurité de ces systèmes impose de représenter puis d'intégrer différents niveaux d'abstraction, chacun étant exprimé suivant une approche de modélisation multiparadigme de la sécurité, qui sera conçue comme un ensemble de langages enrichis de concepts de sécurité ainsi que de processus de modélisation et de fédération de modèles. L'analyse globale de la sécurité des architectures à partir de ces modèles hétérogènes constitue le deuxième objectif du projet.

#### Raúl Mazo Pena :

« L'approche « Security by Design » n'en est qu'à ses débuts et seuls de grands efforts de recherche et de développement permettront son utilisation systématique et générale. Pour relever ce défi, ce projet novateur entreprend de créer une théorie globale, unificatrice, avec des méthodes, des techniques et des outils de conception systématiques. »

## FOCUS &gt; SHAKER

### OPTIMISATION DE L'ÉNERGIE DES SYSTÈMES DE STOCKAGE DE DONNÉES POUR DES APPLICATIONS HPC [CALCUL HAUTE PERFORMANCE]

- Financement : Atos
- Pilote : Jalil BOUKHOBZA, enseignant-chercheur
- Equipe de recherche : SHAKER [interactions logiciels, matériels et environnement]

Les systèmes de stockage représentent l'un des maillons faibles les plus importants dans un système informatique, en particulier pour les applications qui traitent des quantités importantes de données comme c'est le cas dans le domaine du calcul haute performance [HPC].

De nouvelles technologies de stockage émergent et créent l'opportunité de réduire l'écart de performance entre stockage et mémoire de travail mais aussi de limiter la consommation énergétique. Ces technologies sont déployées à plusieurs niveaux : support de stockage, interface ou sa gestion logicielle. Elles impliquent une croissance importante de la complexité de la gestion du stockage afin de garantir la qualité de service des applications.

#### Jalil Boukhobza :

« L'objectif de ce projet est de développer des méthodes et outils permettant de modéliser les profils d'accès aux données de façon frugale et peu intrusive, puis d'utiliser les modèles établis afin de développer des stratégies d'optimisation de la consommation énergétique des nœuds de calcul pendant la phase d'accès aux données. »

Formation  
et Apprentissages  
Professionnels  
UR 7529


# LABORATOIRE

**FoAP** / SCIENCES HUMAINES  
ET SOCIALES

**133** MEMBRES,  
DONT 43 DOCTORANTS,  
49 membres permanents  
et 41 membres associés.

DONT **9** CHERCHEURS  
ET **16** DOCTORANTS  
dans l'équipe Formation  
et Professionnalisation  
des Ingénieurs (FPI)

## FICHE D'IDENTITÉ

- Créé le 1<sup>er</sup> janvier 2019, FoAP a succédé au CRF [Centre de Recherche sur la Formation]
- Il fédère les équipes de sciences de l'éducation et de la formation de l'ENSTA Bretagne, du Cnam Paris et d'AgroSup Dijon.
- Sous statut Équipe d'Accueil : EA 7529
- La gouvernance est collégiale.
-  [foap.cnam.fr](http://foap.cnam.fr)



## PROJET SCIENTIFIQUE DE FOAP

Multi tutelles et inter-régional, FoAP est le seul laboratoire dédié à la formation professionnelle et la formation des adultes en France, et anime ainsi 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.

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.

Historiquement, le ministère des Armées et le ministère de l'agriculture et de l'alimentation ont une importante activité de formation professionnelle initiale et continue. Les équipes des trois établissements partagent la même culture de formation professionnelle, à haut niveau d'expertise, dans des domaines très variés : santé, ingénierie, agronomie, travail social, etc.

### Trois axes thématiques :

- Conception de formations, circulation des savoirs et compétences des apprenants,
- Curriculum et dynamiques identitaires,
- Espaces d'action et apprentissages professionnels.

## CONTACTS

Linda GARDELLE  
Enseignante chercheure,  
responsable du département Sciences  
Humaines et Sociales  
[linda.gardelle@ensta-bretagne.fr](mailto:linda.gardelle@ensta-bretagne.fr)  
T. +33 (0)2 98 34 89 05

Marieke STEIN  
Enseignante chercheure, responsable  
de l'équipe FPI et responsable  
recherche du département  
Sciences Humaines et Sociales  
Directrice de site du laboratoire FoAp  
[marieke.stein@ensta-bretagne.fr](mailto:marieke.stein@ensta-bretagne.fr)  
T. +33 (0)2 98 34 88 65

## TEMPS FORTS DE L'ANNÉE 2021

# CLÔTURE DU PROJET RIIME ET PRÉSENTATION AU MINISTRE JEAN-YVES LE DRIAN

Le projet de recherche international RIIME sur la formation des ingénieurs au Maghreb face aux enjeux Environnementaux (PHC Maghreb) a réuni des chercheurs français, marocains, algériens et tunisiens, entre 2018 et 2021 autour de 3 objectifs :

### **CONDUIRE DES RECHERCHES SUR LES TRANSFORMATIONS DANS LES FORMATIONS D'INGÉNIEURS AU MAGHREB FACE AUX ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX, POUR MIEUX COMPRENDRE CES TRANSFORMATIONS.**

Il s'agissait donc d'identifier et d'analyser les dynamiques en cours.

### **AGIR EN PROPOSANT DES PISTES D'ACTIONS POUR AMÉLIORER LES FORMATIONS.**

Entre chercheurs français et maghrébins, a été co-créé un livret de recommandations et de bonnes pratiques où sont proposées des fiches de cours adaptés aux spécificités du Maghreb, qui permettent d'élaborer des enseignements dans un esprit socio-situé. Y sont proposés aussi des dispositifs à l'échelle d'une école à travers des parcours de formation transverses, collaboratifs et interdisciplinaires, qui visent à permettre aux élèves d'analyser les défis environnementaux et sociétaux d'un territoire et de s'en saisir.

Par exemple comment penser des solutions de recyclage qui apportent du positif au niveau matériel et social à la population d'une grande ville du Maghreb tout en étant viables économiquement. Ou comment penser l'amélioration des conditions de vie des populations sahariennes grâce à des technologies simples, accessibles, légères et écologiques.

### **FORMER DES JEUNES CHERCHEURS**

Le projet a permis la réalisation de 7 thèses co-dirigées entre chercheurs français et maghrébins.

*A paraître en septembre 2022 : Former des ingénieurs face aux enjeux environnementaux au Maghreb, éd. Champ social [ouvrage + livret pratique].*



Présentation du projet RIIME à Jean-Yves Le Drian, ministre de l'Europe et des Affaires Étrangères lors de sa visite à l'ENSTA Bretagne en octobre 2021.

## HOLI-D BLUE

Dispositif holistique de formation des ingénieurs pour comprendre et agir face aux enjeux environnementaux et sociétaux maritimes

L'un des enjeux principaux de ce projet, lancé en 2021, est d'améliorer la contribution des systèmes éducatifs de l'enseignement supérieur (grandes écoles, universités) au développement durable et à la responsabilité sociétale.

Dans ce cadre, le projet HOLI-D Blue ambitionne d'améliorer la formation des étudiants en ingénierie maritime, futurs ingénieurs des métiers de la mer et du littoral, pour leur permettre de mieux comprendre les défis et enjeux environnementaux et sociétaux de ce domaine,

et d'agir concrètement par l'acquisition de compétences techniques, humaines et sociales pour répondre aux problématiques complexes de la transition écologique.

Le projet HOLI-D Blue propose ainsi de co-construire un parcours « Maritime et développement durable », transversal et interdisciplinaire, intégré au cursus de formation initiale d'étudiants de 3<sup>e</sup> cycle des établissements de la communauté ISblue, à commencer par l'ENSTA Bretagne pour le dispositif-test.

## NOUVELLE THÈSE SUR LA FORMATION DES INGÉNIEURS MILITAIRES À L'INNOVATION

Cette thèse financée par l'Agence d'Innovation de Défense est menée par la doctorante Sacha Wallet, sous la direction de Linda Gardelle et co-encadrée par Jean Frances, maître de conférences à l'ENSTA Bretagne.

Cette thèse vise à analyser la trajectoire professionnelle des acteurs - côté Forces et DGA - responsables des missions de prospectives technologiques et d'acquisition de matériels opérationnels. Il s'agira de déterminer comment la formation et la professionnalisation des ingénieurs IETA, et des Officiers en charge des missions d'équipement, influent sur l'introduction d'innovations.



Cette co-construction d'approches pédagogiques est développée avec l'ensemble des acteurs de la formation d'ingénieurs (enseignants et enseignants-chercheurs, étudiants, partenaires du monde socio-économique dont les entreprises locales et les associations étudiantes).

Le projet HOLI-D coordonné par Catherine Adam, Maître de conférences ENSTA Bretagne est co-financé par l'école universitaire de recherche interdisciplinaire spécialisée en sciences et technologies marine, ISBLUE.





# ENSTA BRETAGNE

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE  
DE TECHNIQUES AVANCÉES BRETAGNE

2, rue François Verny  
29806 Brest Cedex 09



[www.ensta-bretagne.fr](http://www.ensta-bretagne.fr)

