

# Centre d'excellence en Intelligence Artificielle et Cybernétique pour Observer les Océans et leurs Faunes

[IACOOF]<sup>1</sup>

*Notes de discussions dans le pôle INPS et la Chaire IA ADSIL pour le PIA4 / Centre Excellence  
Avril 2021*

Le contexte du pôle INPS en terme de visibilité internationale pour préparer une réponse au PIA est en partie:

- Une chaire IA en recherche et enseignement du programme Macron<sup>2</sup>, parmi une trentaine sur toute la France, attribuée à UTLN en IA bioacoustique.
- L'Institut Universitaire de France (top 2% de la recherche française) a élu depuis la création de l'UTLN 2 EC Toulonnais, en IA et en Contrôle Optimal.
- Importance de se joindre à des programmes internationaux, à des ONG / entités internationales comme Pelagos et Fondation Prince Albert II de Monaco, et les Explorations de Monaco.
- En enseignement, notre label internat. d'excellence UTLN est le Mundus MIR.

La thématique de cette proposition de centre est liée à plusieurs projets : ANR, contrat Office Français de la Biodiversité, projet Européen FEDER GIAS BOMBYX, projet OFB CARIMAM, ANR ADSIL, Exploration de Monaco Sphyrna Odyssée

Dans l'environnement géographique proche de Toulon, la concurrence de l'AMU est forte, avec un dynamisme important avec la création des Instituts qui vont devenir les vaisseaux amiraux de l'AMU, et en particulier AMUTECH. Dans ce contexte, peut-on rester "petit bras" face à la construction d'instituts qui se veulent d'excellence, au risque de se faire avaler dans les années qui viennent si chacun joue seul (ou pire la division) de son côté à l'Université de Toulon. Il est à noter que les instituts intègrent également le volet formation, ce qui les rend complets, visibles, et puissants.

Une des solutions serait de répondre à AMUTECH par un Institut orienté sur les axes proposés ci-dessous pouvant être baptisé TUTECH (Toulon University Tech). A la différence de l'AMU, et dans l'esprit MIT, cet institut pourrait être axé sciences dures et centré sur les points forts de l'Université en termes technologiques numériques : LIS/IM2NP/COSMER/MIOphy?/MAPIEM? + plateformes technologiques UTLN + Master Mundus + Master ROC + ?...

Les discussions dans INPS, en lien avec ce contexte, convergent notamment sur l'idée d'un centre d'excellence en IA et Cybernétique pour Observer et Explorer les Océans. Cela concerne à la fois les recherches en électronique, en IA embarquée, système très basse consommation, algorithmique IA, recherche en robotique et contrôle optimal, en codage numérique et en traitement du signal, pour améliorer nos connaissances sur les milieux marins et leur faune, notamment leurs falaises et canyons qui bordent Toulon et s'étendent jusqu'à Monaco, milieux atypiques car jouxtant des ports de dimension internationale, mais aussi les plaines abyssales des océans.

---

<sup>1</sup> Contact : Hervé Glotin, Pr UTLN, CNRS LIS lab, membre honoraire Institut Universitaire de France, titulaire de la Chaire IA bioacoustique ADSI, directeur INPS, membre cofondateur du Master MIR, directeur de la Mission Sphyrna des Explorations de Monaco, <http://bioacoustics.lis-lab.fr>, [glotin@univ-tln.fr](mailto:glotin@univ-tln.fr)

<sup>2</sup> <https://anr.fr/fr/detail/call/chaieres-de-recherche-et-denseignement-en-intelligence-artificielle/#>

Le milieu marin Toulonnais est influencé par la présence du courant liguro-provençal et par les mouvements verticaux dans toute sa colonne d'eau, dynamique complexe qui alimente une chaîne trophique du plancton aux super-prédateurs dont les mammifères marins. L'humain prend conscience de son implication dans la dégradation de ce milieu très anthropisé et plusieurs projets ont été développés, financés par les pouvoirs publics et laboratoires de recherche, de jeunes entreprises, d'Instituts de la mer, ou d'organismes directement impliqués dans les activités maritimes, dont les Explorations de Monaco et la Fondation Prince Albert II avec les Missions Sphyrna Odyssey 2018 2025. À Toulon, dans INPS, au cœur de cette dynamique, plusieurs laboratoires travaillent de concert, et certains de leurs travaux sont déjà mondialement reconnus.

Prenons comme illustration, non exhaustive, la surveillance de la mégafaune méditerranéenne (Cachalots, Globicéphales, Rorquals, Dauphins Tursiops, Dauphins de Risso...) qui se concentre le long de ces falaises et dans les canyons de la côte varoise, offrant ainsi à la métropole de Toulon une position privilégiée au niveau international et unique pour leur étude. Ces espèces fragiles, dont la plupart sont menacées, sont les meilleurs indicateurs de l'état de santé de cet écosystème pélagique. Leur présence régulière atteste de son bon état de santé, car il ne peut y avoir de grands cétacés en abondance que si l'écosystème peut les nourrir. En revanche, la décroissance de leur population est un indice de la dégradation du milieu et des proies dont les cétacés dépendent. La préservation de ces espèces «parapluie» impose la préservation de l'ensemble de l'écosystème qui les supporte. Les fonctions uniques de la mégafaune océanique sont essentielles. «Si nous perdons des espèces, nous perdons des fonctions écologiques uniques... nous devons agir maintenant pour réduire les pressions humaines croissantes sur la mégafaune marine...» [Fuse20]. Réciproquement, la disparition de cette mégafaune aurait un impact sur cet écosystème des falaises sous-marines.



Fig.1: (a) Meute de 3 cachalots préparant leur sonde, (b) 15 globicéphales au large de Toulon (crédit photos V&F Sarano), (c) Diversité fonctionnelle de la mégafaune marine [Fuse20], les cétacés en représentent 25% des fonctions et 36% des taxons.

La protection de ce milieu complexe passe par une meilleure compréhension et par le maintien d'une surveillance continue et de **proximité du milieu**. CIACCO se propose en PIA4 de développer des recherches pluridisciplinaires en ce sens, en IA et robotique et contrôle, ou encore suivi acoustique [Jen21, Glo21, Glo20, Pou20, Fer20a,b...], afin de discriminer, apprendre, modéliser, et finalement comprendre ce milieu complexe. En effet, pour ce qui est des cétacés notamment, l'acoustique est une des modalités les plus pertinentes pour l'étude de ces espèces parapluie (Fig.2-9). Ces approches passives garantissent des observations neutres et objectives à l'échelle océanique, c'est-à-dire dans des volumes de plusieurs km<sup>3</sup> sans perturber l'écosystème. Les émissions sonores sont vitales aux cétacés, non seulement pour communiquer, mais également pour se repérer et pour chasser. Cette extrême dépendance acoustique rend les cétacés particulièrement vulnérables aux pollutions sonores anthropiques, dont la croissance suit l'explosion du trafic maritime. Les données acoustiques acquises depuis 7 ans par le réseau de surveillance mis en place par le LIS UTLN offrent un référentiel et un retour d'expérience unique au monde qui permettra de mesurer l'évolution concomitante des bruits anthropiques et de l'abondance des populations de cétacés, même les

plus cryptiques.

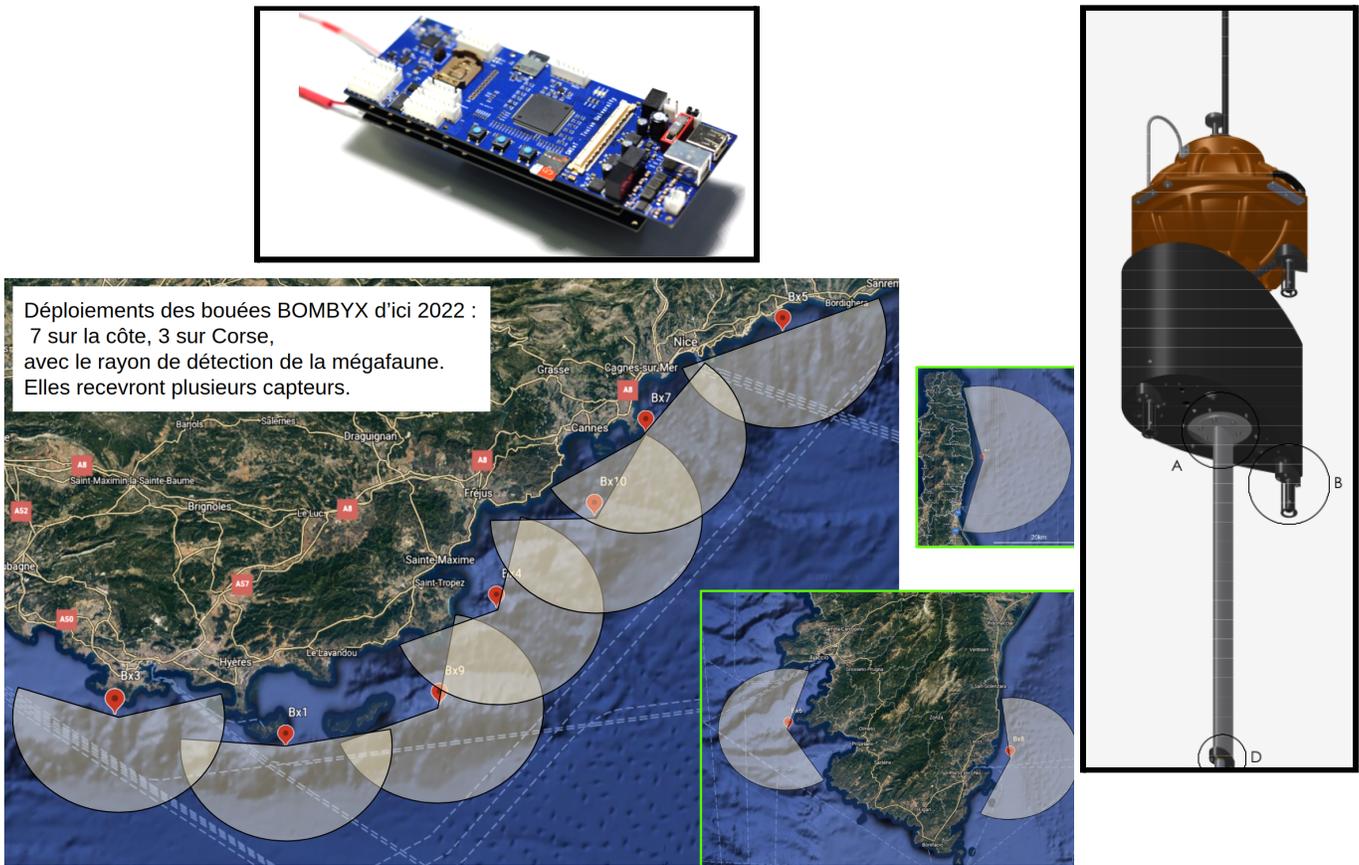


Fig. 2 : (a) la carte SMIoT QHB équipant avec IA embarquée la bouée BOMBYX2 (b), déployée en 10 dans Pelagos par UTLN DYNI LIS UTLN d'ici 2022.

Dès 2015, le LIS a construit et posé une bouée acoustique, stéréophonique, au large de Port-Cros (Bombyx2a Fig.2), en collaboration avec le MIO UTLN pour ses mesures océanographiques. Ces enregistrements, importants pour le SHOM notamment, contiennent les pistes des passages de la mégafaune (Cachalots, Globicéphales, Rorqual, Tursiops...). L'UTLN a acquis alors une expérience inédite au niveau international, car Bombyx1 était la première bouée bioacoustique long-terme stéréophonique. Nous présentons un exemple de ces observations relatives aux cachalots Fig.3.

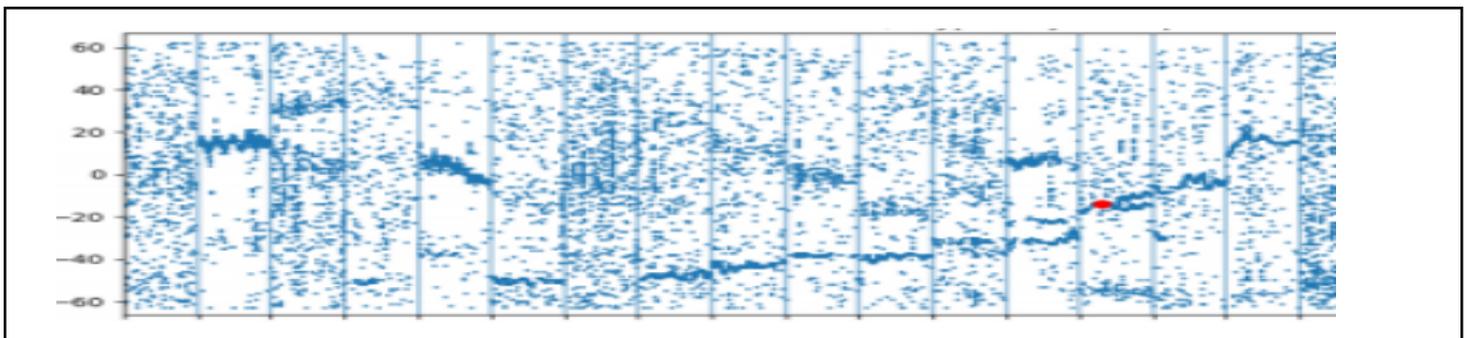


Fig.3 : Exemple de suivi de la population de cachalots au large de Toulon durant 4 ans par la bouée stéréophonique Bombyx1 au sud de Port-Cros, de 2015 à 2019 [Glotin 2017, Poupard 2020] (a) Trajectoire (en temps d'arrivée,  $1\text{bin} = 1/50\text{ks}$ , ouverture inter-hydrophone=1.83m) d'un cachalot sur 3h (observation de 5 / 20min).

CIACOO groupe plusieurs institutions concentrées sur ces paradigmes connexes :

- Acoustique ; antenne acoustique ; signal faible
- IoT ; Low power ; high sampling
- IA ; IA embarquée ; GPU ; deep learning
- Robotique et Contrôle Optimal
- Modèle par IA des dynamiques des courants et des vents ; upwelling ; courant de profondeur
- Estimation par IA du front océanique
- Signatures acoustiques : espèces (sur transitoires notamment) ; clan ; biométrie individuelle
- Suivi des comportements ; suivi des interactions entre individus identifiables
- Signature individuelle génétique
- Communication biologique
- Théorie de l'information ; cognition des cétacés
- Anthropophonie ; pollution chimique
- Sonar ; biosonar ; doppler
- IA et changement climatique
- Prédiction ; gestion de risque
- Serious Game ; modèle ; prédiction.

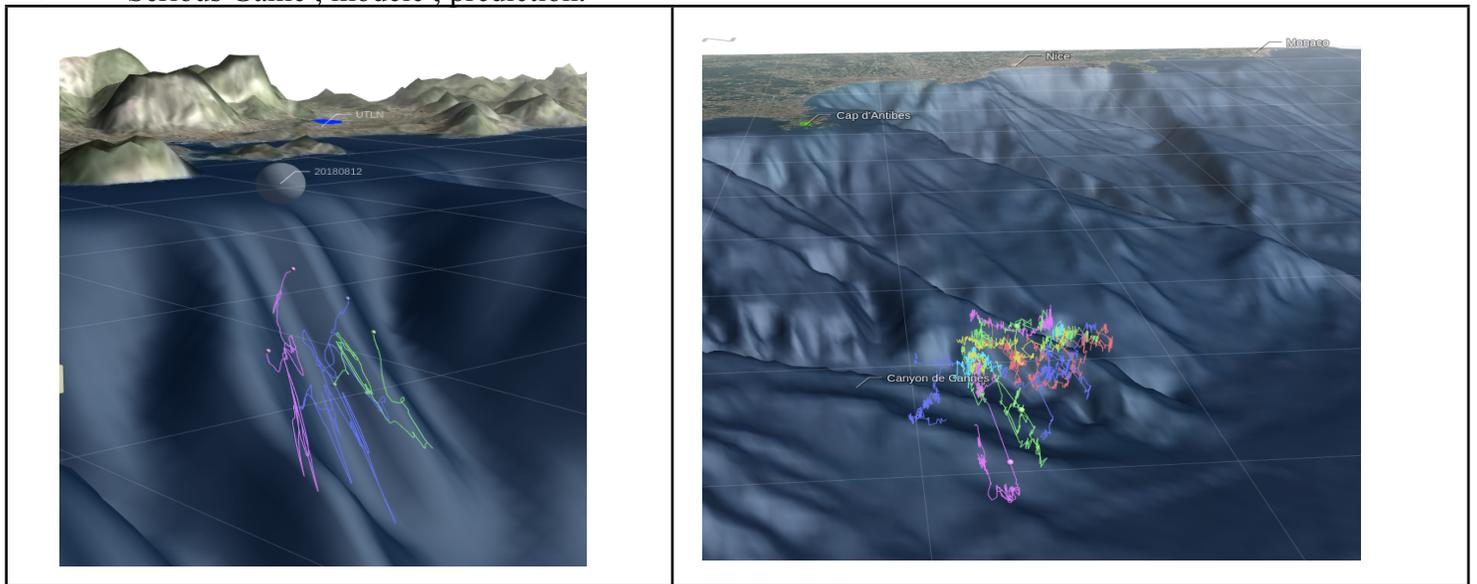


Fig.4 : sondes 3D calculées par acoustique passive depuis la surface (a) cachalot au cap Sicié [Pou19], (b) meute de 6 cachalots à Antibes (2020.01.14), ces prédateurs restent concentrés 3h au centre d'un vortex (c), vers -1km [Glo20].

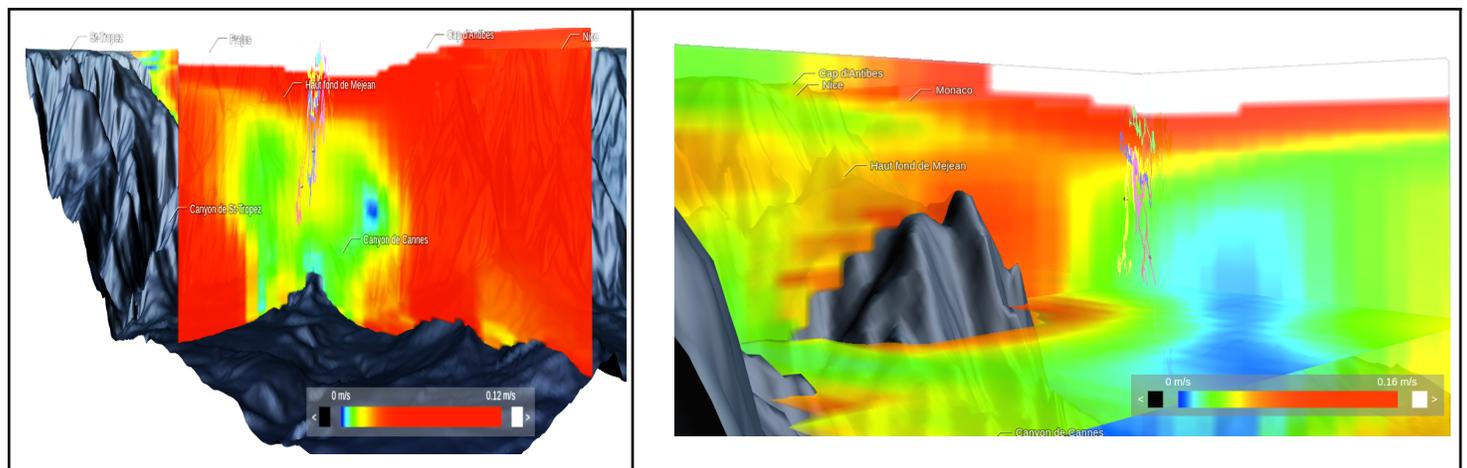


Fig.5 : Idem Fig.3 pour la meute du 20200114 chassant à 4mn du Mont Méjan. La norme locale des courants est

*pixélisée en couleur : on voit les pistes des cachalots pénétrer dans une colonne de fort gradient [Glo20].*

L'IoT, l'IA et la modélisation océanologique sont des spécialités déjà en interaction sur plusieurs laboratoires d'INPS. Interactions qui sont des atouts maîtres pour ce suivi en volume des cétacés.

De plus, avec le développement d'instrumentations de précision, IoT et IA, autonomes avec intelligence intégrée pour l'aide à la décision, une question fondamentale émerge, *i.e.* le "où et quand" déployer de tels capteurs et "pour quelle performance". Pour apporter des éléments de réponse, notamment pour solutionner le problème de contrôle optimal associé, une approche performante consiste à simuler l'entière du système: de la génération de trajectoires d'animaux marins, intégrant l'ensemble de contraintes cinématiques et comportementales, à la chaîne de classification/détection/localisation par intelligence artificielle, en passant par des modélisations fines de la propagation acoustique. Ce "*Serious Game*", générant des scénarios réalistes et admissibles, est une pierre angulaire de l'intégration de nos méthodes, pour résoudre le problème de déploiement optimal de nos observatoires. On notera que ces approches ont déjà été appliquées avec succès [Cho11,12] pour des problèmes similaires de déploiement de capteurs et de poursuite de cible (Fig.6).

CIACOO ouvre des recherches duales avec des données terrain (Bouées, mission Sphyrna Odyssey, drones acoustiques, observatoires astrophysiques...), et par simulations notamment via le superordinateur national Jean Zay<sup>3</sup>. Nous élaborons, intégrons et faisons interagir nos modules : production biosonar, propagation, reconnaissance automatique par IA des transitoires [Fer20ab,The21] (Fig.6).

Des reconnaissances automatiques des transitoires acoustiques sous-marins sont données Fig.7,8, pour des biosonars et des pulses de rorqual, analysés par nos modèles d'IA 'deep learning', qui permettent notamment de tester des hypothèses de détection ou de codage en milieux anthropisés.

CIACOO repose sur des années d'expertise sur ces approches, notamment démontrées lors des Missions océanographiques Sphyrna Odyssey (SO) 2018-2019-2020... cofinancées par les Explorations de Monaco et La Fondation Albert II de Monaco et recoupant plusieurs dizaines de chercheurs de l'UTLN.

Ces recherches ont conduit au développement d'un système qui contribue de manière significative à notre compréhension des nages abyssales de meutes de cachalots. Les algorithmes bioacoustiques du LIS permettent de calculer en trois dimensions, les déplacements et les orientations relatives des mammifères marins dans plus de 1500m de colonne d'eau. Une découverte majeure est la mise en évidence de "*Chasses en meute de cachalots*" [Glo20] 2018-2019-2020. SO mène une recherche scientifique sur le comportement acoustique des cétacés en fonction de la nature de l'environnement sous-marin qu'ils habitent.

Ces missions des Explorations de Monaco pilotées par UTLNs sont composées de deux robots / navires laboratoires autonomes (ALV Sphyrna, de Seaproven), équipés du système acoustique pentaphonique très haute vitesse conçu par le LIS et SMIoT à l'UTLN, et d'un 'vaisseau amiral' pour l'équipe scientifique qui reçoit les ondes acoustiques envoyées en temps-réel par chaque drone. Le pari pris par H.G. consiste à écouter et localiser en 3D les cétacés à partir de minuscules antennes acoustiques mobiles situées près de la surface sous les coques des drones aux bonnes performances hydrodynamiques.

SO 2018 a été la preuve de concept avec la construction de 3 trajectoires au large du Cap Sicié [Pou19]. La seconde mission a confirmé le protocole de septembre 2019 jusqu'au confinement de la COVID19 en mai 2020, dans le Sanctuaire Pelagos, en Méditerranée occidentale (Majorque et le Golfe du Lion).

---

<sup>3</sup> Le CNRS, DS IN2SI, a offert en 2021 à ces recherches UTLN des mois d'ingénieurs à Saclay en soutien direct sur J. Zay.

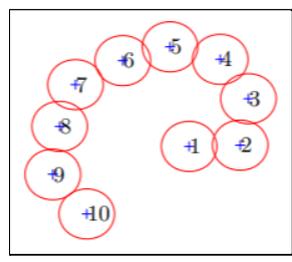
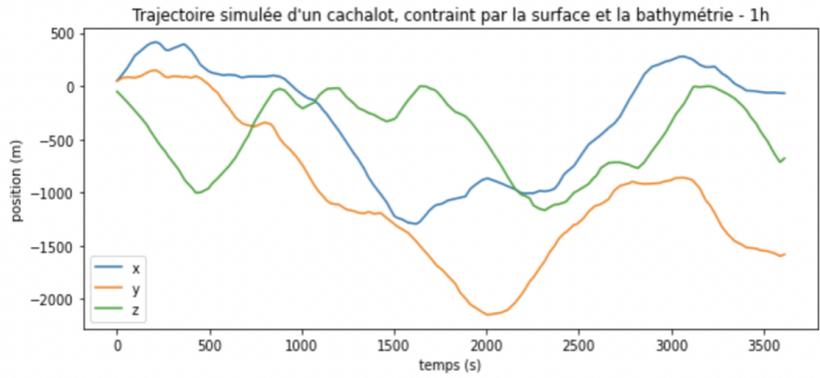
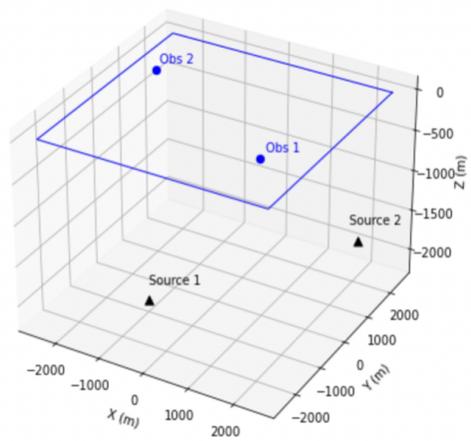
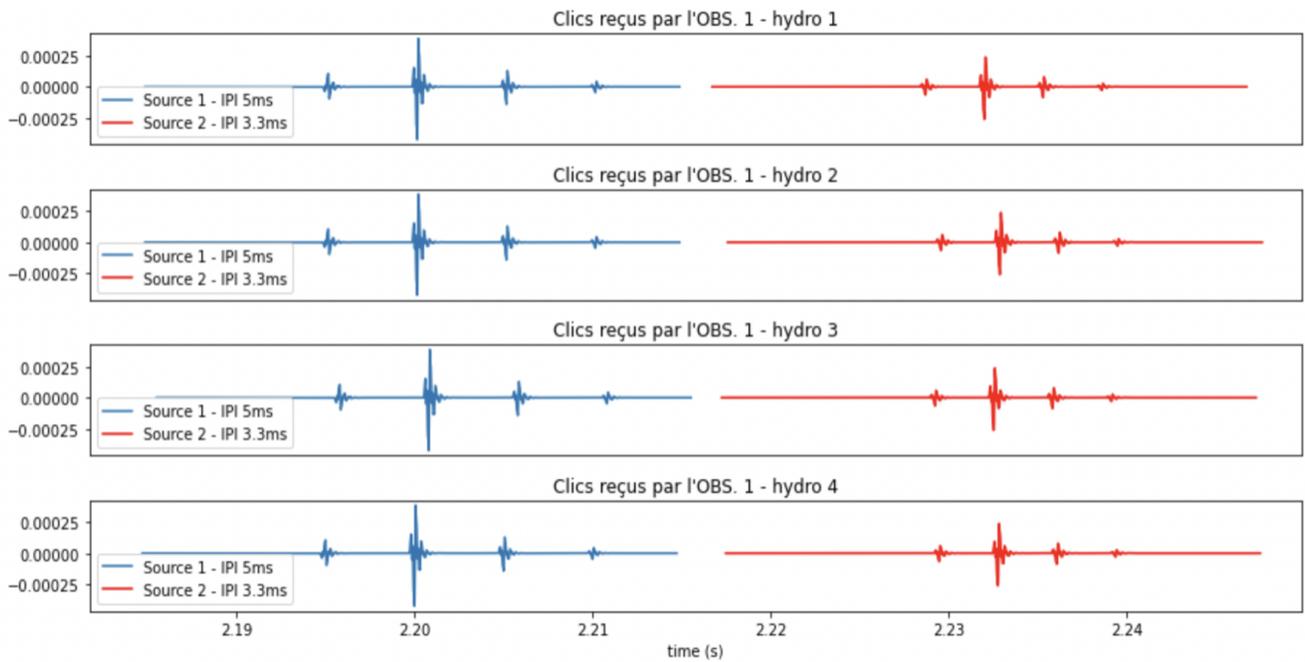


Fig.6 : “Serious Game” acoustique sous-marine en recherche à UTLN [The21] pour étudier les sondes de la mégafaune. Les trajectoires des sources sont générées suivant nos observations (c). Elles émettent des signaux (ici transitoires biosonar de cachalot par ondelette) le long de leur trajectoire. Ils sont réceptionnés (a) par chacun des Observateurs distribués dans l’espace, (b) suivant les nombreux degrés de liberté du simulateur: forme d’onde générée / modèle de source, modèle d’observateur, forme de déplacement, directivité et propagation de la source, bathymétrie, environnement... (d) Simulation de déploiement optimal spatio-temporel de capteurs pour maximiser la détection d’une source [Cho11,12]. Voir démos sur : [http://sabiiod.univ-tln.fr/pub/ADSIL/SERIOUS\\_GAME\\_whale\\_ship/](http://sabiiod.univ-tln.fr/pub/ADSIL/SERIOUS_GAME_whale_ship/)

SO a recueilli une masse de données de divers capteurs pour observer l'anthropophonie, les données physiques et chimiques et l'ADN environnemental avant et pendant la COVID 19, montrant les atténuations anthropophoniques et de polluants. SO a pour principaux objectifs l'écoute et la surveillance sans aucune interaction des populations de cétacés plongeant en eaux profondes, tels que les cachalots. Les individus sont donc étudiés dans leur habitat naturel au cours de leurs chasses en meute, collaborations bioacoustiques complexes abyssales. Le comportement des cétacés en plongée profonde est un indice pour l'évaluation de la biodiversité des abysses. Ces recherches permettent de dépeindre le comportement des cétacés dans les abysses sur la base de leur écholocalisation, clic par clic. Cette haute résolution semble montrer que les cachalots construisent un maillage d'émetteurs-récepteurs à une distance d'environ 500m les uns des autres, semblant user d'un principe de bio-multistatisme pour chasser: les informations engendrées par les sonars de chacun sont partagées par tous... à l'instar des systèmes humains de chasse sous-marine. Ces découvertes sont riches en perspectives sur la compréhension plus fine des perturbations anthropophoniques.

La structure des clics biosonars contient des informations temporelles et spectrales qui pourraient porter des signaux de communication superposés à leur fonction d'écholocation (Fig.7). Ces découvertes suggèrent, à moyen terme, de nouveaux critères concernant la pollution sonore et les systèmes anti-collision de ces superprédateurs des abysses avec le trafic maritime. Réciproquement, les pulses voisés pourraient porter en plus des dialectes, des informations d'écholocation (Fig.8).

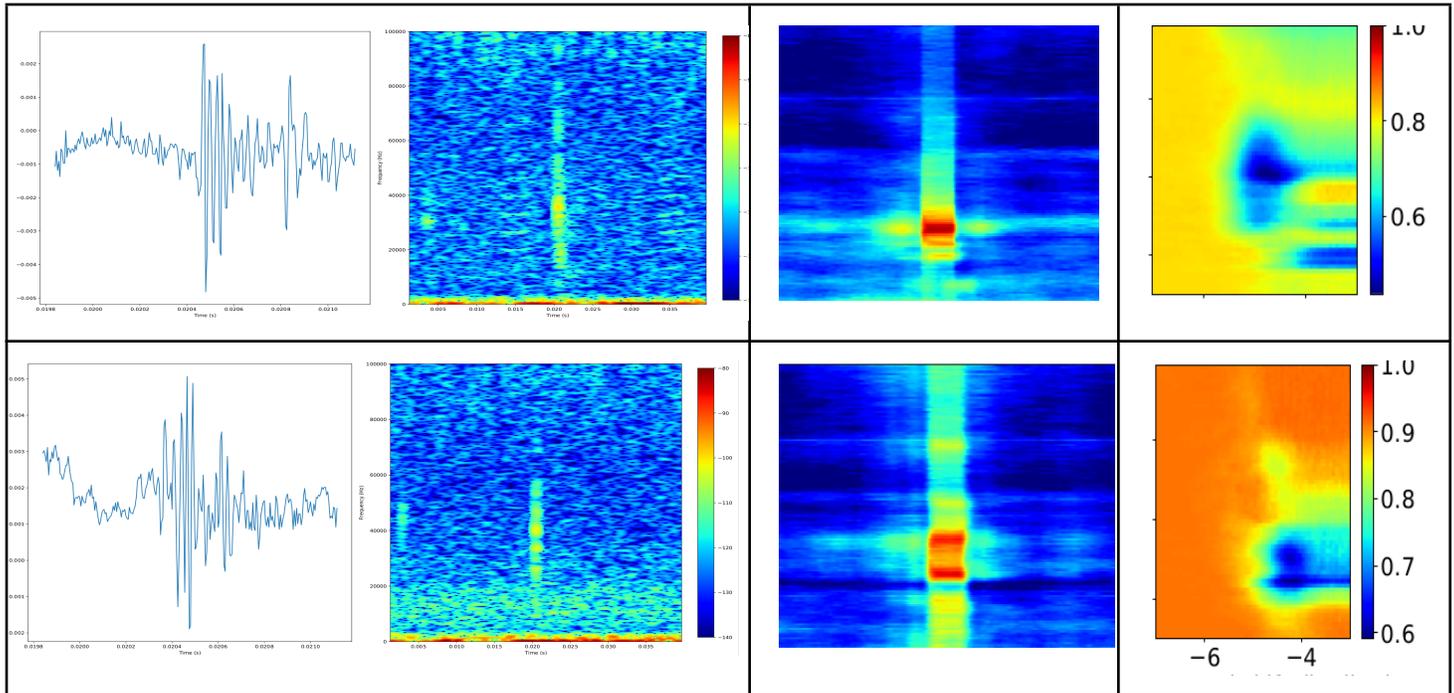
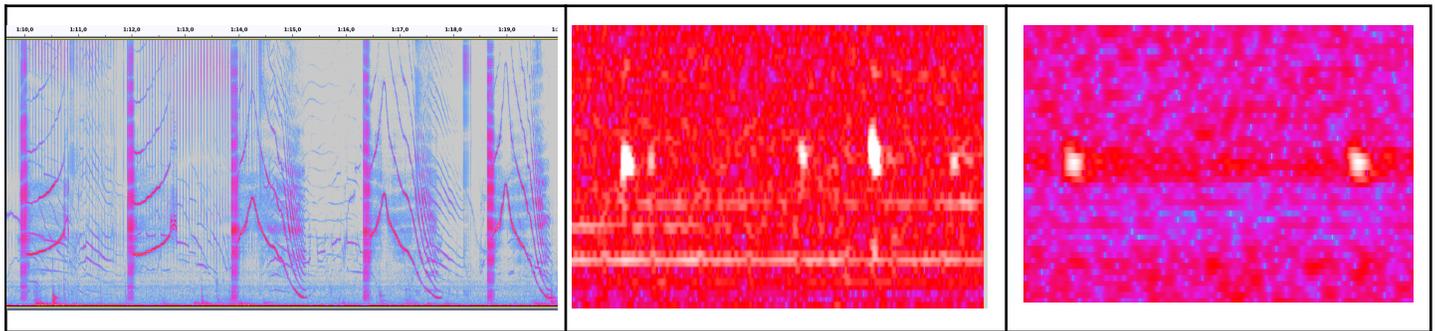


Fig. 7 : Exemple d'expérience par IA sur l'information temps-fréquence des biosonars. (Haut, Gauche) Forme d'onde (192kHz Fe, 16bits) et spectrogramme (largeur de bande 0, 0.1MHz) d'un Dauphin de Risso. (Milieu) Carte d'activation moyenne temps-fréquence d'un réseau de neurones (deep learning appris sur 20000 clics de cette espèce). (Droite) Indice de perte de performance de ce modèle IA du fait d'un déphasage des signaux originaux (déphasage croissant en abscisse, -4 vaut pour 2 bins de jitter). (Bas) idem pour la Baleine à Bec de Cuvier [Fer21]. Cette expérience démontre que le biosonar du Dauphin de Risso aurait un codage de phase bimodal (sur 20 et 40kHz), versus le Ziphius monomodal (30kHz). Cette approche par modèle permet une analyse des codes biosonars.



*Fig. 8 : Exemple de vocalises: (Gauche) Globicéphales non loin de Toulon, 2020 [SO20] sur 20kHz de largeur de bande montrant la complexité de dialectes. (Milieu) Pulses de Rorqual Commun de Toulon Mai 2020 (spectrogrammes 0 à 40Hz, 20s) enregistrées pied de Porquerolle par KM3env par -2.5km de fond. (Droite) Idem depuis la bouée Bombyx1 -30m proche de Port-Cros en 2018, dans les deux cas détectées par réseau de neurones. Ces formes portent une information claque [Pat19] qui pourrait être identifiée par IA et liée aux déplacements de populations accélérés par le réchauffement climatique.*

CIACOO a pour but de fédérer chercheurs, marins, groupes étatiques ou non, entrepreneurs, autour d'un centre de recherche clairement identifié, visible par la région, transverse à leurs structures d'appartenance, et de permettre d'accroître leur dynamique et d'assurer un rayonnement fort de leurs résultats, et à une réelle amélioration de la situation écologique de la façade française de la Méditerranée nord-occidentale. Plusieurs thématiques et entités connexes à court terme sont listées ci-dessous, montrant une quinzaine d'équipes, soit environ 40 Enseignants/Chercheurs ou Ingénieurs.

#### **Thématique / Équipes de laboratoires connexes :**

- Bioacoustique: LIS, IM2NP, LAMFA (Univ. Jules Vernes)
- IoT of the Ocean: SMioT, IM2NP, LIS
- Automatique, Robotique: LIS, COSMER
- Intelligence Artificielle: LIS, IM2NP, INRIA Nancy, Chaire IA ADSIL, Projet Eur. GIAS Interreg
- Acoustique: LMA (AMU), LAMFA, LIS, Longitude 181
- Instrumentation low power pour la mesure scientifique: IM2NP
- Modèle océanique surface et profond: MIO, IMATH, Longitude 181
- Dérive d'objet, pollution, carcasses, plastique en mer: MIO, LIS, MAPIEM?
- Drones pour l'exploration et la mesure distribuée: COSMER, SEAPROVEN, (?IFREMER)
- Assimilation de données: LAMFA, LIS
- Trajectographie: LIS, IM2NP?
- Codage: IMATH, LIS
- Serious Game: LIS, PREMAR, CROSSMED
- Bio-Multistatisme: LIS
- Gestion des risques et législation: PREMAR, FMES, CERC.

#### **Groupes externes intéressés :**

Sanctuaire Pelagos, Parc National de Port-Cros, PREMAR, CROSSMED, AIDLab, Longitude 181 ONG, MIRACETI ONG...

#### **Groupes R&D intéressés :**

OSEAN (instrumentation acoustique et marine), SEAPROVEN (drones), SemanticTS (propagation), TRIPinLAB (sonification)...

**Groupes potentiels :** Naval Group, Alseamar, iXblue, NORTEKMED, IFREMER...

# References

- [Abe13] Algorithmes d'extraction robuste de l'intervalle-inter pulse du biosonar du cachalot : applications éthologiques et suivi des populations, 2013, Abeille, thèse de doctorat UTLN, dir Glotin, Giraudet
- [Bar20] A novel low-power high speed accurate and precise DAQ with embedded artificial intelligence for long term biodiversity survey, 2020), Barchasz, Gies, Marzetti, Glotin, Eu. Forum Acusticum [http://sabiiod.univ-tln.fr/pub/QualiHighBlue\\_DAO\\_FA2020.pdf](http://sabiiod.univ-tln.fr/pub/QualiHighBlue_DAO_FA2020.pdf)
- [Bes20] Deep Learning and Domain Transfer for Orca Vocalization Detection, 2020, Best, Ferrari, Poupard, Paris, Marxer, Symonds, Glotin (2020), In Joint conference on neural networks. IEEE IJCNN, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02865300/document>
- [Bou19] Behavioural responses of humpback whales to food-related chemical stimuli, 2019, Bouchard, Barnagaud, Poupard, Glotin, et al., PloSone 14.2
- [Cho11] On the probability distribution of a moving target. Asymptotic and non-asymptotic results, 2011, Chouchane, Paris, Le Gland, Musso, Pham, in Information Fusion
- [Cho12] Splitting method for spatio-temporal sensors deployment in underwater systems, 2012, Chouchane, Paris, Le Gland, Ouladsine, in Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization
- [Fer20a] 3D diarization of a sperm whale click cocktail party by an ultra high sampling rate portable hydrophone array for assessing individual cetacean growth curves, 2020, Ferrari, Glotin, Oger, Marxer, Asch, Gies, Sarano, Forum acusticum, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03078655/document>
- [Fer20b] Docc10: Open access dataset of marine mammal transient studies and end-to-end Convolutional Neural Net classification, 2020, Ferrari, Glotin, Marxer, Asch, IJC Neural Net, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02866091/document>
- [Fer21] Classification of Marine Mammal Clicks by Raw Audio Multiscale Hierarchical Convolutional Neural Network and a Study of Learned Representations, 2021, Ferrari, Glotin, Marxer, Asch, sub. in J. of American Soc of Acoustics, special issue on Machine Learning for Bioacoustics
- [Fer20a] Study of a Biosonar Based on the Modeling of a Complete Chain of Emission-Propagation-Reception with Validation on Sperm Whales, Ferrari, 2020, Phd Thesis, Univ. Picardie Jules Verne & LIS UTLN <https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-03078625/document>, dir Glotin, Asch
- [Fuse20] Functional diversity of marine megafauna in the Anthropocene, Pimiento, Leprieur, Silvestro et al., Science Advances, 2020, V6N16, DOI:10.1126/sciadv.aay7650
- [Glo20] SphyrnaOdyssey Report 1, Glotin, Thellier, Best, Poupard, Ferrari et al., 2020, <http://sabiiod.org/SO1.pdf>
- [Glo18] Anticollision system, GIAS Interreg project, 2019, Glotin et al., ICD OSEAN & UTLN
- [Glo20] Chaire IA ADvanced underSea Intelligent Listening: ADSIL, 2020-24, Glotin, <http://bioacoustics.lis-lab.fr>
- [Jen21] AI for current modelisation, 2020-23, Jenkins Phd Thesis, dir Glotin, Ourmière, Paiement
- [Mar20] Ultra-Low Power Wake-Up for Long-Term Biodiversity, 2020, Monitoring, Marzetti, Gies, Barchasz, Best, Paris, Barthelemy, Glotin, in proc. IEEE IoTAIS
- [Pat19] Contributions en méthodes pour le suivi de mysticètes par acoustique passive, 2019, Patris, thèse de doctorat UTLN, dir Glotin, Asch
- [Pou19] Real-time passive acoustic 3D tracking of deep diving cetacean by small non-uniform mobile surface antenna, 2019, Poupard, Ferrari, Schlüter, Marxer, Pavan, Glotin, IEEE Acoust. Sig & Speech Proc.

[Pou20] *Contributions en Méthodes Bioacoustiques Multiéchelles: Spécifiques, populationnelles, individuelles et comportementales*, Poupard, 2020, Phd Thesis, Univ. Toulon [http://sabiiod.org/pub/poupard/cv/m\\_poupard\\_phd\\_08012021.pdf](http://sabiiod.org/pub/poupard/cv/m_poupard_phd_08012021.pdf), dir Glotin, Soriano, Lengagne

[Sar20] *Kin relationships in cultural species of the marine realm: case study of a matrilineal social group of sperm whales off Mauritius island, Indian Ocean*, 2021, Sarano, Girardet, Sarano, Vitry, Preud'homme, Heuzey, Garcia-Cegarra, Madon, Delfour, Glotin, Adam, Jung, *Royal Society Open Science* 8:201794. <https://doi.org/10.1098/rsos.201794>

[The21] *'Serious Game' pour l'étude de la mégafaune*, 2020-23, Thellier, Thèse Chaire IA ADSIL, dir Glotin, Paris, Marxer