

INTITULE DU PROJET	Productivité biologique et circulation des eaux dans le Golfe du Lion : une étude prospective intégrant des observations à long terme et de la modélisation numérique
ACRONYME	PROBILION
ETABLISSEMENT BENEFICIAIRE	Université de Perpignan Via Domitia
PORTEUR SCIENTIFIQUE DU PROJET	Xavier DURRIEU DE MADRON
UNITE DE RECHERCHE DU PORTEUR SCIENTIFIQUE (NOM ET ADRESSE)	Centre de Formation et de Recherche sur les Environnements Méditerranéens (CEFREM) Université de Perpignan Via Domitia 52 avenue Paul Alduy 66860 Perpignan cedex
ECOLE DOCTORALE – DOCTORANT 1	ED305

➤ **Localisation**

☑ *Lieu(x) où se déroule le projet : localisation de l'unité de recherche et des terrains d'étude le cas échéant...*

CEFREM, UMR5110 CNRS-UPVD
Collaboration avec LOMIC (CNRS-SU, Banyuls/Mer) et LEGOS (CNRS-CNES-IRD-UT3, Toulouse)

➤ **Résumé pédagogique du projet :**

Ce projet explore l'impact du changement climatique sur les formations d'eau dense dans le Golfe du Lion en Méditerranée nord-occidentale, une des rares zones où se forment des eaux profondes au sein de la mer Méditerranée. Ce phénomène est crucial pour soutenir la productivité des écosystèmes marins, mais les observations menées au CEFREM depuis 30 ans démontrent une diminution nette de son intensité en lien avec le réchauffement récent. Le projet de thèse vise ainsi à mieux comprendre les facteurs qui contrôlent la variabilité de ce phénomène à la côte et au large en combinant observations, modélisations et projections. Plusieurs facteurs sont étudiés, notamment les apports d'eau douce des fleuves et les conditions océaniques. Le projet utilise des méthodes d'apprentissage automatique et des modèles numériques utilisant des observations accumulées pour identifier les facteurs déclencheurs et évaluer leur impact sur l'écosystème marin.

➤ **Positionnement du projet :**

Ce projet aborde l'impact du changement climatique sur le fonctionnement des écosystèmes marins et s'intègre au DSI « économie du littoral et mer » de la région Occitanie. Le golfe du Lion est une zone clé, qui présente l'une des plus fortes productivités biologiques en Méditerranée, liée aux apports d'éléments nutritifs des fleuves et au mélange hivernal des masses d'eau qui fait remonter des éléments nutritifs des eaux profondes. Les apports fluviaux et le mélange hivernal, responsables de la formation des eaux denses côtières, sont particulièrement sensibles aux changements hydrométéorologiques en cours et à venir. Cette zone abrite plusieurs aires marines protégées, dont le parc naturel marin du Golfe du Lion, qui englobe des canyons sous-marins abritant des espèces patrimoniales de coraux profonds dont la présence est liée à l'écoulement des eaux denses côtières. Ces courants sont également le vecteur principal de l'exportation vers le bassin profond des pollutions anthropiques.

➤ **Objectifs du projet :**

Le projet a pour objectif de déterminer les facteurs influençant les formations d'eau dense à la côte par rapport à ceux influençant les formations d'eau dense au large dans le golfe du Lion. Il s'agit en particulier de comprendre pourquoi, à l'exception des rares événements extrêmes concomitants pour les deux zones, les événements intenses de formations d'eau dense à la côte sont plus épisodiques que les formations d'eau dense au large.

Outre les facteurs communs aux deux régions (vent, flux de chaleur), plusieurs facteurs influençant spécifiquement la formation d'eau dense côtière seront étudiés, à savoir (1) les apports d'eau douce par les fleuves qui ont pour effet de renforcer la stabilité de la couche de surface proche du littoral, zone principale de formation, (2) l'accumulation d'eau dense sur le plateau continental pendant les périodes de préconditionnement automnal et de mélange hivernal qui peut être interrompu lors de tempêtes d'est.

À l'aide d'observations accumulées par le CEFREM depuis 30 ans, une analyse statistique par méthodes d'apprentissages issues du *machine learning* des facteurs environnementaux, sera mise en œuvre afin d'identifier les constellations de facteurs déclenchants.

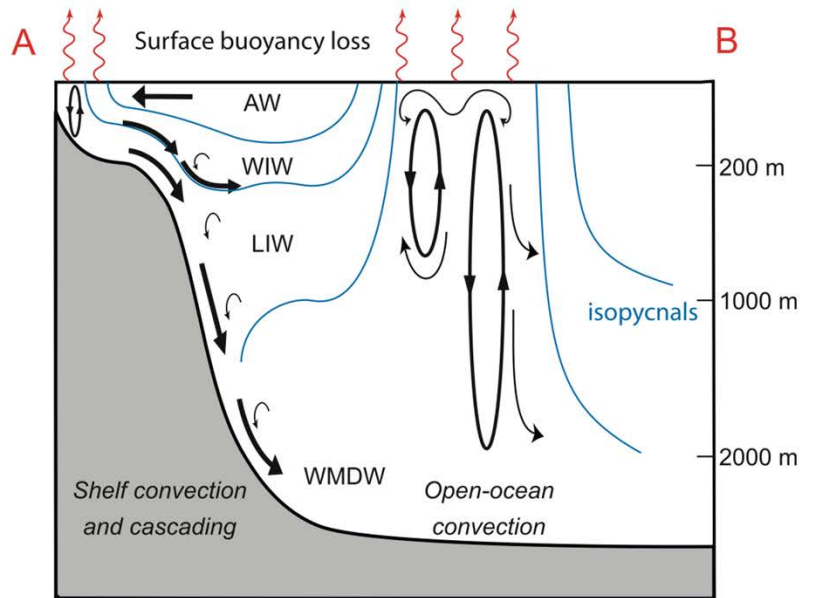
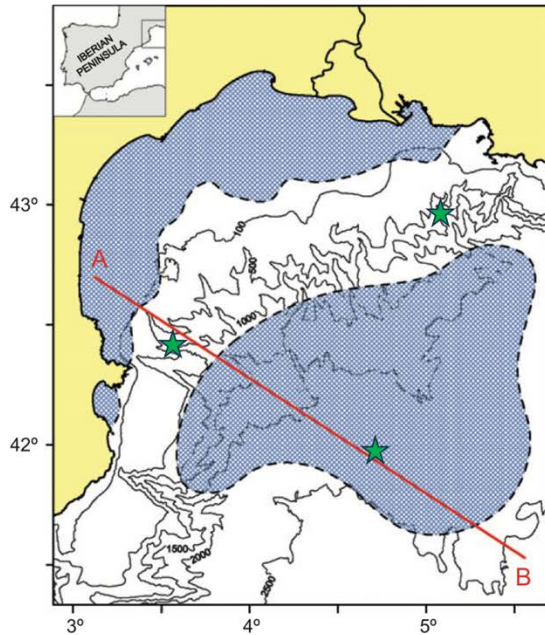
Parallèlement, le projet visera à mettre en place des expériences réalistes de modélisation numérique à haute résolution, en utilisant le modèle de circulation SYMPHONIE développé à l'OMP. Ces simulations seront comparées aux observations pour la validation, puis l'effet des facteurs environnementaux clés mis en évidence à partir des observations sera testé à partir de différents scénarii. Ces expériences permettront de diagnostiquer les conditions discriminantes entre les formations des eaux denses à la côte et au large, et l'évaluation de leur rôle respectif sur la productivité planctonique, à la base de la chaîne trophique. À terme, la combinaison de la modélisation avec la projection des conditions hydroclimatiques fournira les trajectoires pour les décennies à venir.

➤ **Description détaillée du projet scientifique :**

Les formations d'eau dense sont un phénomène complexe qui joue un rôle essentiel dans la circulation océanique, la ventilation des eaux profondes, et l'équilibre des écosystèmes marins. Ces masses d'eau, plus denses en raison de la salinité et de la température, se forment sous des conditions spécifiques en hiver, influencées par des facteurs tels que les variations saisonnières de flux de chaleur, le mélange vertical des eaux superficielles par le vent, les interactions entre les différentes masses d'eau, les courants océaniques et les apports d'eau douce.

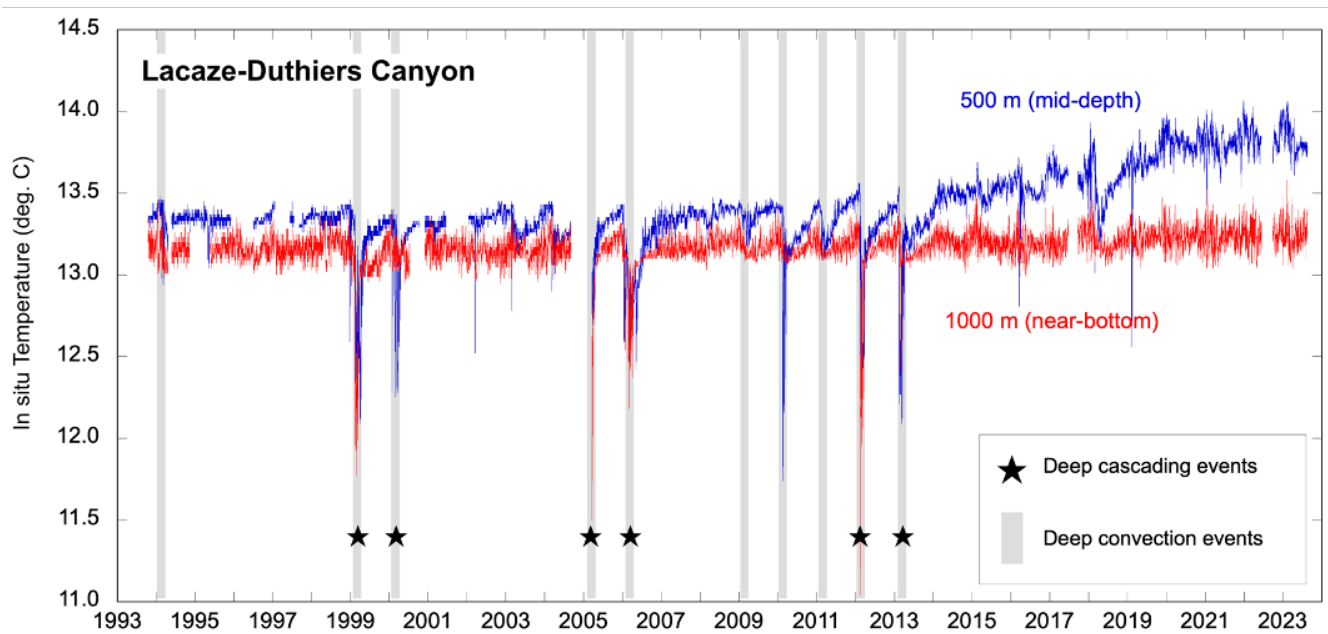
La mer Méditerranée constitue un laboratoire naturel idéal pour étudier ce phénomène en raison de ses conditions environnementales et du temps de résidence réduit des eaux qui accentuent l'effet du changement climatique. Le golfe du Lion est l'un des rares endroits au monde où ce phénomène se produit à la fois à la côte et au large, en faisant un site d'étude privilégié.

Le CEFREM étudie depuis plusieurs décennies ce phénomène tant à la côte qu'au large, dans le cadre en particulier du réseau d'observation MOOSE (Mediterranean Ocean Observing of the Environment, <https://www.moose-network.fr>), à l'aide de lignes fixes et de plateformes dérivantes autonomes.



Carte du Golfe du Lion montrant les régions de formation d'eau dense côtière et au large (zones hachurées) et décrivant les processus de cascade d'eau dense côtière et de convection en haute mer à travers le golfe avec les masses d'eau impliquées (AW Atlantic Water; WIW : Western Intermediate Water; LIW : Levantine Intermediate Water; WMDW Western Mediterranean Deep Water) [1]. Les sites de mesure à long terme sont indiqués par des étoiles vertes.

Ces observations révèlent la récurrence annuelle des formations d'eau dense côtière qui se traduit par des refroidissements hivernaux jusqu'à 500 m de profondeur. De rares événements intenses apparaissent en 1999-2000, 2005-2006 et 2012-2013 à 1000 m, concomitamment aux formations d'eau dense et profonde au large. Ces événements ont contribué à la modification des caractéristiques physico-chimiques des eaux profondes de la Méditerranée occidentale [2,3]. Depuis 2014, les formations d'eau dense à la côte et au large montrent une réduction importante de leur intensité associée à une augmentation très significative de la température des eaux intermédiaires [4,5].



Séries temporelles de températures mesurées entre octobre 1993 et juin 2023 à 500 m et 1000 m de profondeur dans le canyon Lacaze-Duthiers au sud-ouest du golfe du Lion. Les événements de cascade profonde d'eau dense côtière sont indiqués par des étoiles noires et les événements de convection profonde au large sont indiqués par des bandes grises [5].

Les événements intenses de formation d'eau dense ont suscité l'intérêt de la part des modélisateurs. Des simulations numériques ont permis de mieux comprendre leur variabilité saisonnière [6, 7], leur impact sur les cycles biogéochimiques [8, 9, 10] et leur sensibilité au changement climatique [11, 12]. Cependant plusieurs questions restent sans réponse concernant la variabilité interannuelle des

formations d'eaux denses côtières qui se révèlent être plus complexes que celles du large, bien que les forçages atmosphériques soient communs aux deux régions. Ces questions sont : (1) qu'est-ce qui explique l'apparition par paire des événements intenses de formation d'eau dense côtière ; Y a-t-il une sorte d'« effet mémoire » entre ces années consécutives ? (2) Qu'est-ce qui explique, certaines années (en particulier entre 2009 et 2011), la relative faiblesse des formations d'eau dense côtière alors que la convection au large atteint le fond du bassin ? Les hypothèses de travail sont que plusieurs facteurs impactant spécifiquement la zone côtière peuvent agir et interférer : (1) les apports d'eau douce par les fleuves, en particulier lors des crues, qui ont pour effet de renforcer la stabilité de la couche de surface proche du littoral, zone principale de formation ; (2) l'accumulation d'eau dense sur le plateau continental pendant les périodes de préconditionnement automnal et de mélange hivernal qui peut être interrompu lors de tempêtes d'est ou des intrusions du courant de pente. L'intensité et le *timing* au cours de l'hiver de ces deux facteurs sont supposés avoir un impact significatif, à même d'atténuer l'effet des forçages atmosphériques. De telles situations contrastées entre la côte et le large sont supposées devenir de plus en plus fréquentes avec le réchauffement climatique.

Les principaux objectifs de cette étude sont les suivants :

- Analyser les données d'observation à long terme, issues de diverses sources (navires, sites instrumentés, plateformes dérivantes et images satellites) afin d'identifier les mécanismes sous-jacents à l'intensité de la formation des eaux denses côtières et leur effet sur la production planctonique. Des paramètres tels que la température, la salinité, la densité, les courants, les concentrations en chlorophylle seront examinés. Une analyse statistique par méthodes d'apprentissages issues du *machine learning* des facteurs environnementaux sera mise en œuvre.
- Valider des modèles numériques représentant les processus physiques et biogéochimiques régissant la formation d'eau dense côtière. Le modèle hydrodynamique SYMPHONIE, couplé au modèle biogéochimique ECO-3M sera utilisé pour simuler la formation et le devenir des eaux denses sur la période des observations (1993-2023). Les résultats du modèle seront validés par rapport aux observations. Différents scénarii permettront de diagnostiquer les conditions discriminantes entre les formations des eaux denses à la côte et au large.

Références: (1) Puig et al. *Prog Oceanogr*, 2013 ; (2) Durrieu de Madron et al., *Geophysical Research Letters*, 2013; (3) Houper et al., *J. Geophys. Res.*, 2016; (5) Margirier et al., *Sci. Rep.*, 2020 (5) Durrieu de Madron et al., *Water*, 2023 ; (6) Ulses et al., *J. Geophys. Res.*, 2008; (7) Estournel et al., *J. Geophys. Res.*, 2016; (8) Kessouri et al., *J. Geophys. Res.*, 2018; (9) Ulses et al., *Biogeosciences*, 2021; (10) Many et al., *Biogeosciences*, 2021; (11) Hermann et al., *Cont. Shelf Res.*, 2008; (12) Somot et al., *Clim. Dyn.*, 2016.

➤ **Présentation du caractère exploratoire du projet :**

Le golfe du Lion est une des rares régions où la productivité biologique en surface dépasse nettement la productivité des autres régions en Méditerranée. Il héberge ainsi des écosystèmes particulièrement riches qui forment le socle de l'économie du littoral et de la mer (surtout pêche et tourisme) en Région Occitanie. Cette productivité exceptionnelle est en grande partie liée à un phénomène océanographique peu connu par le grand public : le mélange hivernal et la formation des eaux denses rompent la stratification de la colonne d'eau et font remonter des eaux profondes, particulièrement riches en phosphore et azote (éléments indispensables soutenant la productivité biologique en surface). Cependant, depuis le réchauffement général des eaux par le changement climatique récent, les indicateurs d'un ralentissement de la formation des eaux profondes se multiplient et des conséquences drastiques sur la productivité biologique et la biodiversité des écosystèmes sont à craindre.

Les observations à long terme qui seront utilisées sont uniques dans leur genre et sont au centre du réseau d'observation MOOSE, composante régionale de l'infrastructure de recherche littorale et côtière (IR-ILICO, <https://www.ir-ilico.fr/>) dirigée par le CNRS et l'IFREMER. Le sujet est novateur dans le sens où les questionnements sont apparus suite à l'évolution récente des conditions environnementales dans le golfe du Lion (réchauffement des eaux intermédiaires et quasi-disparition des événements intenses de formation d'eau dense depuis 2014). Ce changement drastique par rapport aux observations faites depuis 30 ans suggère un changement de paradigme concernant le fonctionnement des écosystèmes marins dans la région. Par ailleurs, les outils numériques développés ont atteint aujourd'hui un degré de maturité et de fiabilité qui permet d'adresser des questions

précises auxquelles il aurait été difficile de répondre auparavant.