



## Dossier TECHNIQUE

PROPOSITION DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE SPATIALE

Année 2023

### RENSEIGNEMENTS GENERAUX

Intitulé Proposition :	COURANTS
Acronyme Expérience ou projet : (limité à 10 caractères)	WaCM-&-al.
Proposition nouvelle :	OUI
Proposition déjà engagée (Année APR) :	

### SCIENTIFIQUE PROPOSANT

Nom :	Fabrice Ardhuin
email :	ardhuin@ifremer.fr
Structure/Laboratoire :	LOPS
Organisme gestionnaire :	CNRS

### CO-PROPOSANTS

Email	Structure/Laboratoire	Organisme gestionnaire
stephane.meric@insa-rennes.fr	UMR CNRS 6164 IETR	CNRS
sophie.cravatte@ird.fr	LEGOS	CNRS
lionel.renault@ird.fr	LEGOS	CNRS
Rafael.almar@ird.fr	LEGOS	CNRS
florent.gasparin@ird.fr	LEGOS	CNRS
louis.marié@ifremer.fr	LOPS	CNRS
frederic.nouguier@ifremer.fr	LOPS	IFREMER
nicolas.grima@univ-brest.fr	LOPS	CNRS
nicolas.rascle@ifremer.fr	LOPS	CNRS
erwan.rahoult@insa-rennes.fr	IETR	CNRS
eric.pottier@insa-rennes.fr	IETR	CNRS
guy.grunfelder@insa-rennes.fr	IETR	CNRS
maria.garcia-vigueras@insa-rennes.fr	IETR	CNRS
cecile.leconte@isea-rennes.fr	IETR	CNRS
erwin.bergsma@cnes.fr	CNES	

## PROPOSITIONS NOUVELLES

### OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Les courants à la surface de l'océan sont une variable climatique essentielle (ECV) qui joue un rôle déterminant dans les échanges air-mer de chaleur, d'énergie et de gaz, et pour le mélange océanique. Il n'y a actuellement aucune mesure directe des courants réalisée par satellite. L'observation des courants de surface repose sur un réseau limité de mesures in situ par flotteurs dérivants (Surface Velocity Program, SVP)

et mouillages, et sur des estimations indirectes, à partir des anomalies de niveau de la mer des satellites altimétriques, et du vecteur vent qui est soit modélisé soit estimé par les diffusiomètres. Ces estimations utilisent l'hypothèse géostrophique et la théorie d'Ekman pour arriver à un courant de surface qui peut se rapprocher du vecteur courant vrai pour les échelles spatiales et temporelles supérieures à 200 km et 15 jours (Ballarotta et al. 2019). La Figure 1 illustre la part des courants qui n'est pas observée aujourd'hui et représente 60 à 90% de l'énergie cinétique de surface, en particulier proche de l'équateur et au milieu des bassins océaniques. Les échelles spatiales non résolues par les méthodes d'observations actuelles jouent un rôle particulièrement important dans les échanges verticaux et l'évolution de la méso-échelle océanique (Levy et al. 2012, Renault et al. 2016,2019).

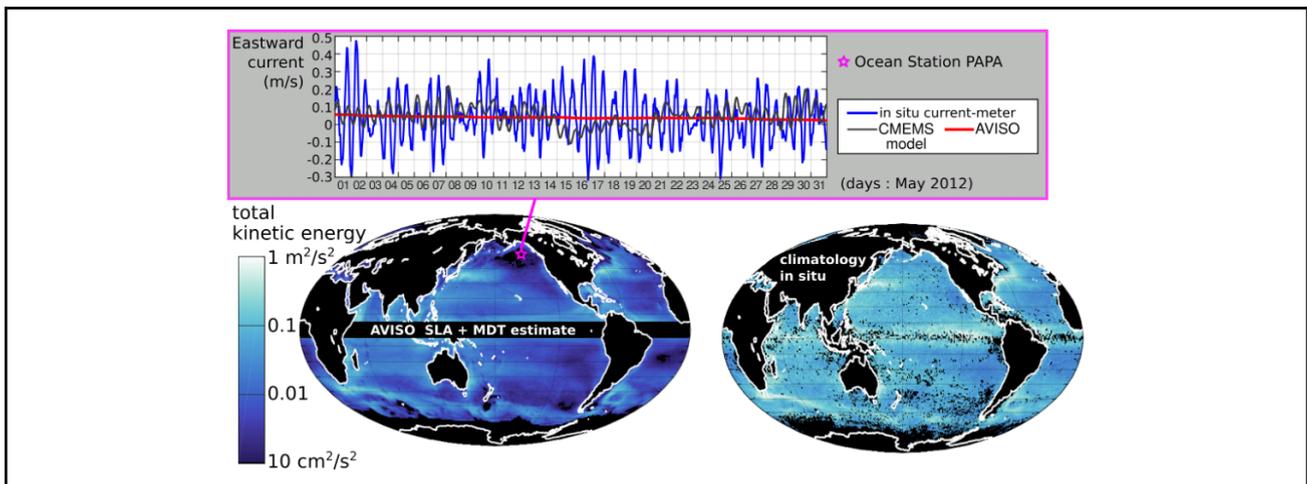


Figure 1: En haut, séries temporelles du courant zonal pour mai 2012 à la station PAPA (Pacifique Nord-Ouest): mesure in situ, réanalyse GLORYS et estimation AVISO. La part de l'énergie cinétique des courants haute fréquence ou haute résolution qui n'est pas observée est typiquement de 80% et plus.

L'objectif central de la présente proposition est de contribuer à la réalisation d'une mission spatiale pour la mesure directe du vecteur courant de surface de l'océan avec une couverture globale, en cohérence avec la prospective du CNES réalisée en 2019.

A ce jour, la seule méthode de mesure qui peut raisonnablement fournir une couverture globale en quelques jours est la diffusiométrie radar Doppler (Chapron et al. 2005, Nouguier et al. 2018, ESA 2019), dont la faisabilité a été démontrée par la phase A SKIM pour Earth Explorer 9. Les techniques Along-Track Interferometry (ATI) retenues pour les missions Harmony (EE10) et SEASTAR (un des 4 candidats EE11) sont limitées par la puissance nécessaire pour l'opération d'un ou plusieurs SARs en continu, mais peuvent offrir des mesures bien moins bruitées et donc une bien meilleure résolution (Romeiser et al. 2014).

Si la contribution du courant est un terme important du signal Doppler observable, en particulier à haute fréquence (bande Ka) et incidence élevée (30° et plus), la contribution des vagues est une partie importante (dominante à faible incidence) dont l'estimation précise peut utiliser soit une mesure directe du spectre des vagues, soit une estimation (GMF) à partir des sections efficaces radar, possiblement en exploitant différentes polarisations (VV et HH). La capacité de restituer le vecteur vent et le vecteur courant à partir d'une seule polarisation (VV) et de la section efficace radar, est un des principaux enjeux du projet suborbital S-MODE qui permet la mise en oeuvre du radar aéroporté DopplerScatt (Rodriguez et al. 2019).

Les perspectives pour arriver à une mission ou un instrument dédié à une mesure globale des courants sont

- un instrument radar de type SKIM (Arduin et al. 2019, ESA 2019: faible incidence et fauchée de l'ordre de 300 km obtenue par balayage conique, soit un temps de revisite moyen de 3 jours). Suite à l'évaluation favorable faite par l'ESA à l'issue de la sélection dans le contexte Sentinel 3 nouvelle génération (S3NG): il semble que cette possibilité poussée par l'ESA ne soit pas le scénario nominal pour S3NG

- un instrument radar à plus grande fauchée (Rodriguez 2019) permettant - entre autres - une séparation plus propre entre oscillations proche-inertielles et courants géostrophiques, mais ne permettant pas de mesurer les vagues (temps d'intégration trop court sur la tache au sol). La limitation des ambiguïtés possibles sur la contribution des vagues au signal Doppler peut demander une multi-polarisation (VV et HH) ou l'utilisation de données ancillaires. La proposition STREAM faite à Earth Explorer 11 avait fait le pari d'un apprentissage de cette contribution des vagues grâce à l'ajout d'un instrument optique (STREAM-O) qui en principe peut aussi permettre d'accéder au cisaillement vertical dans la fauchée optique. La proposition "Wind and Current Mission" (WaCM) en cours de préparation pour un appel NASA en 2022 repart du point de fonctionnement de l'instrument STREAM-R avec une tache au sol plus large en "range" afin d'éviter la présence de trous entre les tâches au sol du "pencil beam".

L'équipe proposante est particulièrement mobilisée sur la rédaction de la proposition WaCM portée par Sarah Gille (UCSD/SIO) et Ernesto Rodriguez (JPL). Le travail préparatoire associé à WaCM pourrait aussi permettre de présenter une proposition au 12<sup>ème</sup> appel "Earth Explorer" de l'ESA, en fonction des conditions de l'appel: le concept STREAM ayant été jugé trop cher, le budget disponible pour EE12 décidera du concept qui peut être utilisé (faible ou moyenne incidence). Les calendriers Explorer NASA et Earth Explorer 12 ESA ne devraient pas permettre d'avoir le résultat des présélections NASA avant une soumission EE12.

Le travail proposé vise donc à renforcer la crédibilité scientifique et technique des techniques de mesures, et notre compréhension des processus physiques à l'interface air-mer. Cette contribution est complémentaire à d'autres activités, en particulier

- Etude ESA "A-TSCV" sur l'assimilation de données de courant (activité piloté par UK Met Office et impliquant Mercator Ocean International, OceanDataLab et OceanNext),
- Interpretation and Analysis of SKIM Campaign Observations (IASCO) : contrat ESA, pilotage L. Marié.
- études ESA sur le Doppler de Sentinel 1 réalisées par OceanDataLab : traitement des données Wave Mode (combinaison des données gyroscopes et Doppler) et IW (prise en compte additionnelle des variations de température des modules de l'antenne de Sentine 1).
- S-MODE, projet sub-orbital financé par la NASA à hauteur de 50 MUSD autour du démonstrateur aéroporté DopplerScat. (<https://espo.nasa.gov/s-mode>)
- accompagnement ESA pour STREAM: analyses complémentaires des différences entre mesure optique (dispersion des vagues) et radar Doppler (projet et cours de montage avec ESA: pilotage LOPS)

Ce projet fait suite au projet "STREAM" déposé en 2021 pour 2022, et en reprend la structuration. Il fait suite aussi au projet SKIM (2019-2021) qui a accompagné la phase A ESA EE9. L'expérience acquise lors de la phase A SKIM a montré l'importance des campagnes aéroportées pour établir le bon niveau de "Science Readiness Level". Cela demande une préparation en amont et le développement d'un démonstrateur aéroporté, complémentaire de DopplerScat (avec en particulier une grande flexibilité sur les angles d'incidence). Ce développement fait suite à des actions déjà engagées avec le CNES, en particulier la thèse de Erwan Rahoult, commencée en octobre 2021, sur le design de l'instrument ASWIM.

## DESCRIPTION DETAILLEE DE LA PROPOSITION

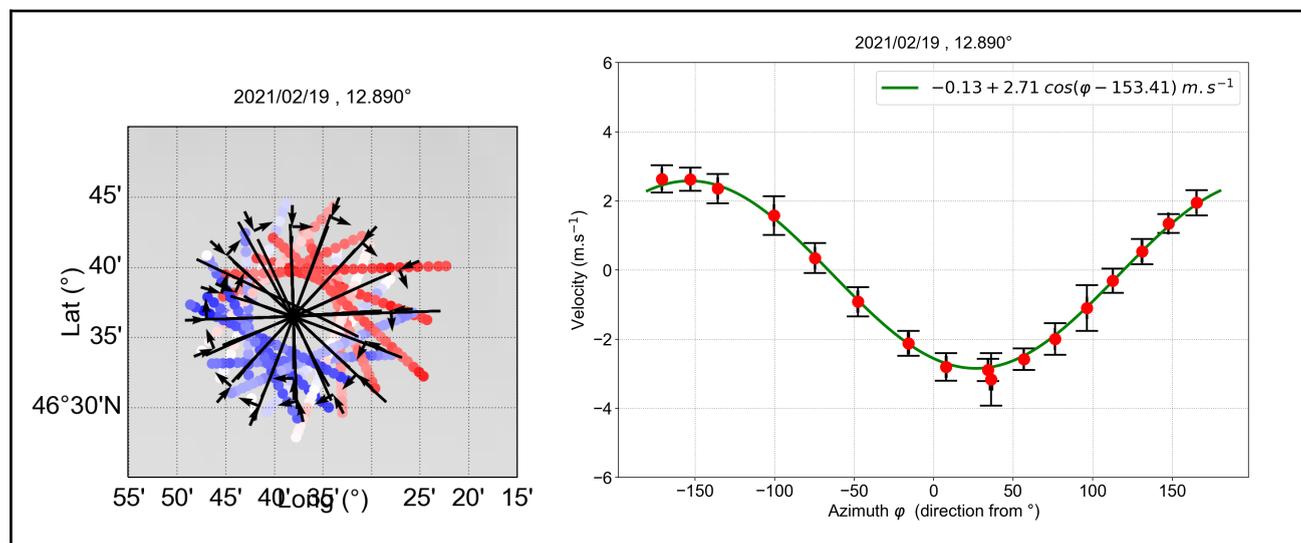
La présente mise à jour du projet couvre donc les 5 tâches définies dans la proposition pour 2021, avec quelques propositions d'aménagement liées à l'évolution du contexte (WaCM, EE12 ...).

### Tâche 1: Organisation de la communauté scientifique autour des projets WaCM ou autre

La nouveauté de la mesure Doppler et la spécificité de l'échantillonnage temporel (par rapport aux radars HF) demande un travail important de dialogue avec la communauté scientifique pour mieux cibler les questions scientifiques qui sont à la portée de telles mesures, et ajuster, si besoin, les spécifications (requirements) des missions proposées. Il est donc important d'être présent non-seulement aux colloques de télédétection (OSTST, Living Planet 2025, ...) en faisant le lien avec les techniques existantes (altimétrie, diffusiométrie) qui ont des communautés scientifiques structurées, ainsi que d'aller au devant des chercheurs sur des thématiques que les techniques existantes ne permettent pas de bien couvrir. Au vu de la nouveauté des mesures de vitesses en région équatoriale, il est particulièrement important de faire le lien avec les communautés scientifiques travaillant autour des réseaux d'observation in situ: Tropical Pacific Observing System (TPOS), PIRATA dans l'Atlantique et RAMA dans l'océan Indien.

### Tâche 2: Capteur ASWIM (Advanced Sensor for ocean Winds measurements - Capteur avancé pour la mesure du vent océanique) et mesures aéroportées (S. Méric et L. Marié)

La mesure aéroportée est indispensable pour valider les hypothèses des modélisations numériques de la rétrodiffusion à la surface de la mer, et vérifier la sensibilité des quantités observées (section efficace radar et Doppler centroïde) aux paramètres instrumentaux (fréquence radar, polarisation, largeur de faisceau, vitesse du porteur) et environnementaux (vecteurs vent et courant, état de mer, surfactants, variabilité spatiale de ces paramètres). Les activités proposées visent à compléter la connaissance de la physique de la mesure pour les angles d'incidence inférieur à 20°, pertinents pour un concept de type SKIM, en complément des angles plus élevés échantillonnés par DopplerScatt lors des campagnes S-MODE.



**Figure 2:** Doppler centroïdes mesurés par KaRADOC lors du vol du 19/02/2021 (la vitesse radiale varie de -3 à +3 m/s. A gauche la "marguerite" avec les virages (bout des pétales) coupés: les courbes noires sont les transect de l'avion avec un cap constant et les flèches indiquent le sens de vol et la direction de visée. A droite moyenne du Doppler centroïde le long de d'un transect en fonction de l'azimut de visée. Ces valeurs du Doppler sont cohérentes avec l'effet des vagues donné par le modèle de Nouguier et al. (2018), avec une faible augmentation par rapport aux cas mesurés en Iroise en 2019 avec des états de mer plus faibles (Marié et al. 2020).

Lors de la campagne de cal/val de CFOSAT en février/mars 2021, le capteur KaRADOC (sur la base du capteur SWALIS) a été embarqué à bord de l'ATR 42 pour effectuer des mesures de rétrodiffusion en bande

Ka pour des angles d'incidence autour de 10°. Ces mesures de rétrodiffusion ont déjà été effectuées en novembre 2018 (campagne DRIFT4SKIM) mais seules les données obtenues à 12° d'incidence ont pu être exploitées. Aussi la demande APR en 2019 avait pour but d'étendre les capacités de KaRADOC à la fois en termes de dynamique de mesure et en plage d'angles d'incidence accessibles. Actuellement les données sont toujours en cours de traitements mais il est possible de ressortir les premiers résultats :

- la dynamique en amplitude des signaux permettant d'accéder à l'information de phase entre les impulsions est estimée à 10 dB (en moyenne)
- les angles pour lesquels cette dynamique est obtenue sont compris entre 3° et 16°.

Un autre point positif de cette campagne est la grande diversité des états de mer qui ont été mesurés. Pour rappel, la configuration de KaRADOC oblige à réaliser une "marguerite" en vol afin de recueillir des valeurs de rétrodiffusion et Doppler pour différents angles d'azimut.

Cette mesure des dopplers centroïdes en concordance avec les données simulées montrent tout l'intérêt d'une mesure radar en bande Ka et que le capteur KaRADOC fournit. En revanche, la configuration actuelle de ce capteur apporte quelques limitations que nous proposons d'améliorer pour début 2023. En effet, plusieurs questions se posent :

- Dans l'exemple des données du 19 février, l'obtention de la totalité des mesures radar s'étale sur un peu moins de 4 heures. Autrement dit, le risque d'avoir une modification de l'état de mer pendant les mesures est non négligeable. Il est alors primordial de pouvoir raccourcir la durée de la mesure afin de s'assurer que cette durée soit plus faible que la durée de corrélation des surfaces éclairées. Il est alors proposé de faire sur un même transect une mesure à plusieurs angles d'azimut afin d'obtenir les mêmes gammes d'angles d'azimut mais en un temps plus court. A priori, la solution d'une antenne tournante n'est pas retenue mais plutôt des positions pré-établies seront suffisantes (par exemple de 0° -point avant- à 180° -point arrière- par pas de 45° sur un seul transect).
- La polarisation de l'antenne KaRADOC est pour l'instant fixée à une configuration HH. La proposition porte sur une capacité de l'antenne à assurer une double polarisation HH et VV. Il faut noter que la technologie "leaky wave" est conservée pour assurer le dépointage nécessaire du faisceau d'antenne en fonction de la fréquence d'émission. Le bloc RF actuel nécessitera des modifications car devant accueillir une nouvelle voie de réception.
- L'utilisation du PNA-X comme organe d'émission, de réception et d'échantillonnage du signal reçu limite les capacités de modification de la forme d'onde et de son agilité. Plusieurs points sont à améliorer :
  - possibilité d'améliorer la résolution en distance (à savoir la distance entre 2 points d'échantillonnage) en augmentant la fréquence d'échantillonnage du signal reçu ou en effectuant une modulation de fréquence de l'impulsion émise.
  - possibilité de gérer les temps d'acquisition et de transfert des données acquises afin de concentrer le temps de vol sur une acquisition et non sur un temps de gestion de transfert des données.

Lorsque la première version de l'évolution du système actuel sera terminée, des vols seront programmés avec PIMA afin de pouvoir assurer une validation des données radar obtenues dans les nouvelles configurations. Ces vols valideront dans un premier temps les performances attendues du nouveau capteur. Il faudra ensuite envisager des mesures nécessitant une vérité terrain.

La proposition est de travailler sur une amélioration du système radar KaRADOC afin de proposer des données radar pouvant satisfaire des besoins scientifiques liés aux propositions STREAM-WaCM. Ce capteur est nommé ASWIM. De plus, nous proposons des premiers vols de validation des performances attendues du capteur ASWIM.

**Évolution de KaRADOC** : il est proposé d'étendre et d'améliorer les capacités radar du capteur KaRADOC. Ces améliorations doivent permettre~:

- d'atteindre des angles d'incidence élevés -autour de 50°
- d'avoir une information liée à la polarisation de l'onde rétrodiffusée
- d'atteindre une résolution spatiale inférieure au mètre (échantillonnage rapide, largeur de bande émise).

De plus, il s'agit d'utiliser la dynamique mise en place par l'arrivée d'un doctorant à l'IIETR (Erwan Rahault en septembre 2021 et soutenance prévue en septembre 2024) dont le sujet de thèse est de reprendre les

travaux déjà réalisés autour du capteur KaRADOC (Jean-Claude Koumi, doctorant jusqu'en novembre 2022) et d'améliorer ces performances. Outre celles qui sont déjà citées ci-dessus, nous pouvons ajouter la mise en place d'un dispositif permettant de diversifier les angles d'azimut pendant un transect de marguerite.

Les travaux de Jean-Claude Koumi et surtout ceux d'Erwan Rahault ont permis d'identifier des éléments d'un nouveau système radar permettant de pallier les limitations de KaRADOC~:

- les capacités de temps de répétition (PRI), du nombre d'échantillons, de la fréquence d'échantillonnage qui montrent une interdépendance (d'où une limitation des choix particuliers d'analyse de la surface de l'océan)
- les temps de latence entre les changements de fréquence d'incidence et de déchargement des données sur le PC de commande pouvant être plus importants que les temps d'éclairage de la surface de l'océan (temps de latence imposés par le PNA-X). En d'autres termes, la proposition d'évolution du système KaRADOC est de passer à un fonctionnement temps réel du système
- la capacité de variation des angles en azimut sur un même transect (il est important de noter que le changement de valeur en azimut ne se fera que pour quelques angles prédéfinis)

Pour réaliser le système ASWIM, il est donc proposé de remplacer le système PNA-X par un système dédié (cartes RF et cartes d'acquisition). Actuellement, la technologie PXI est retenue pour permettre la plus grande modularité du système radar. Les premières investigations permettent d'envisager une première version de ce système sous la forme d'un système PXI d'émission et de réception de signaux radar incluant :

**(1) Numériseur enregistreur rapide de signaux radar**

PXIe Digitizer 12-bit, DC Coupled  
 Bandwidth, full BW enabled (400 MHz)  
 Memory, 4GB, 1G Samples / ch  
 Digital Downconversion  
 Digital down-converter streaming for 1.6GS/s

**(2) Organe de commande embarqué,**

Wideband Recorder Software Fixed Perpetual License (Record only)

**(3) Générateur RF permettant la génération/modulation de signaux électromagnétiques en bande Ka,**

PXIe Microwave Vector Signal Source test set  
 Frequency range, 32 GHz to 44 GHz  
 PXIe Frequency Reference: 10 MHz and 100 MHz  
 Synthesizer VCO + DDS, enhanced performance  
 RF modulation bandwidth, 500 MHz - up to 32/44 GHz frequency  
 I/Q Waveform Memory, 512 Msa  
 Fast switching, 250 microseconds  
 Step attenuator  
 Pulse Modulation, less than 25 ns

**(4) Organe spécifique embarqué d'enregistrement,**

PXIe High Performance System Module: Dual Port (x16) Gen 3

**(5) Châssis PXI recevant l'ensemble des éléments,**

PXIe Chassis: 18-slot, 3U, 24GB/s

## (6) Contrôleur PXI de commande des éléments PXI

PXIe Embedded Controller: Intel i7, 4 GB RAM, 240 GB SSD

De même, pour la réalisation de l'antenne radar, la participation de María García-Vigueras (MCF HDR, spécialiste des antennes et de l'impression 3D) à l'encadrement d'Erwan Rahault permettra d'atteindre les performances attendues pour l'antenne. L'étude correspondante traitera du fonctionnement de l'antenne qui est basée sur le concept d'onde de fuite (*leaky-wave*). La caractéristique pour cette antenne est l'accès à 2 faisceaux simultanément actifs avec 2 états de polarisation différents (H et V). De plus, une fabrication additive novatrice est prévue pour la réalisation de ce type d'antenne nécessitant une haute précision (partenariat avec l'entreprise SWISSto12). L'aspect implémentation sera abordé pour d'atteindre l'angle d'incidence et la gamme des angles d'incidence attendus par les proposition STREAM et WacM..

**Campagnes de mesure :** Des campagnes de mesure à bord de PIMA (plateforme gérée par l'IETR) sont prévues. Le travail de thèse d'Erwan Rahault traitera ces campagnes de mesure pour valider les développements de l'antenne et du système. De plus, en lien avec la tâche 3, des vols de validation (au moins assurés par PIMA, plateforme aéroportée gérée par l'IETR et qui a déjà été utilisée pour les validations de KaRADOC avant la campagne SUMOS) des traitements radar avec les nouvelles spécifications seront réalisés. Enfin, dans les spécifications mécaniques d'élaboration du nouveau système, nous pouvons anticiper une intégration mécanique du nouveau capteur pour les campagnes S-MODE.

Il faut noter que ce projet de thèse se trouve être aussi une réelle opportunité pour aborder l'étude des milieux hydrologiques. La communauté scientifique est en attente de ce type de données pour préparer les traitements pour l'hydrologie continentale. Ainsi, cette tâche permettra de mettre en place les instrument nécessaires et les collaborations utiles à la réalisation de démonstration aéroportée d'un futur démonstrateur du radar STREAM-R

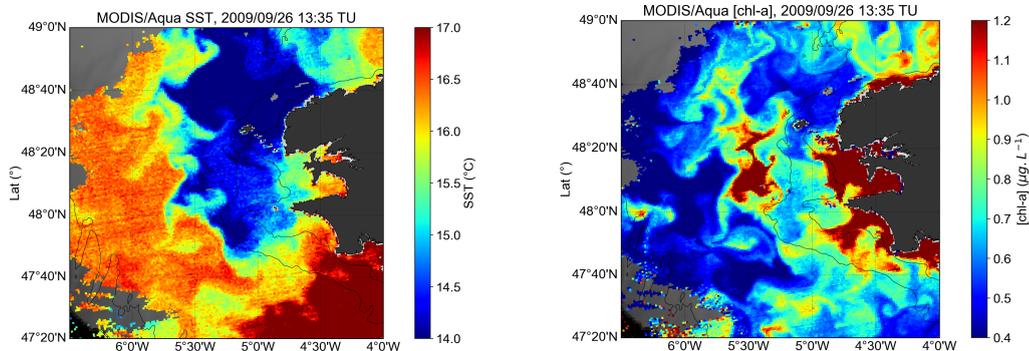


Figure 3: Observations satellite de température de surface de la mer (gauche) et de concentration de surface en chlorophylle (droite) collectées le 26/09/2009 au-dessus de la mer d'Iroise par le capteur MODIS/AQUA de la NASA (© NASA).

La mise en oeuvre opérationnelle du capteur ASWIM est envisagée dans le cadre d'une campagne de terrain en Iroise à l'échéance 2024. L'Iroise est en effet une zone-atelier particulièrement appropriée pour ce type de travaux, car elle est d'accès aisé, car elle comporte une structure géophysique, le "Front de marée d'Ouessant" (voir figure 3 ci-dessus), pour l'étude de laquelle les observations aéroportées (de courant, température et couleur de l'eau) ont une réelle plus-value scientifique, car elle fait l'objet d'un effort de recherche multidisciplinaire soutenu depuis une quinzaine d'année, qui bénéficiera des observations recueillies, et enfin car elle est instrumentée de façon pérenne par des sites de mesure des courants de surface par radar HF.

Les travaux envisagés comportent:

- d'une part, la réalisation de mesures aéroportées conjointes radar (ASWIM) et optiques (système de caméras thermique et visibles LagadIR développé au LOPS) sur la zone frontale.

- d'autre part, la réalisation sur temps CNFC (demande à déposer en réponse à l'AO de février 2023) d'une campagne de mesures in-situ comportant le lâcher de bouées dérivantes de surface et le déploiement dans la zone frontale de deux mouillages équipés l'un d'un anémomètre sonique haute fréquence et l'autre d'un profileur de courant acoustique.

### Tâche 3: physique de la mesure et algorithmes d'inversion

#### 3.1 Mesure de vitesse de surface par radar

La mesure radar à une incidence de  $45^\circ$  (STREAM) ou  $55^\circ$  (WaCM) avec une seule polarisation (VV), est ambiguë: pour un vecteur courant donné et un vecteur vent donné il existe plusieurs valeurs possibles de la section efficace radar (NRCS) et du centroïde Doppler (DC). En particulier on s'attend à un effet de l'âge des vagues ainsi qu'un effet des gradients de courants (et du vent, voire la présence de surfactants...) sur les NRCS et DC moyennés à l'échelle de la cellule de mesure (environ 5 km).

Plutôt que de travailler sur l'inversion, nous allons plutôt nous concentrer sur l'étude de la variabilité des états de mer (en particulier en exploitant des mesures optiques), et, par la simulation, sur leur impact sur les NRCS et DC. Le simulateur de télédétection R3S (Nouguier et al. 2019) a fait l'objet de nombreux développements qui ont été intégrés sous la forme d'une librairie python, avec le concours de N. Grima (qui de fait a fait le travail d'optimisation et de mise en forme que nous pensions confier à un CDD dans la proposition pour 2022). Il est toujours prévu que l'exploitation du simulateur soit réalisée avec le soutien d'un CDD, mais la demande pour 2022 a été réduite à 6 mois (au lieu de 9).

R3S est actuellement capable de traiter des scènes homogènes (en termes d'état de mer, vent et courant). Des développements prévus en 2022 et 2023 permettront de prendre en compte de façon plus ou moins réaliste la variabilité spatiale du vent (via la mss) et des vagues (enveloppe variable spatialement) et les courants (déplacements horizontaux similaire à la correction "choppy" de Nouguier et al. (2009)). Les tests réalisés en 2023 porteront surtout sur des scènes homogènes afin de comparer la sensibilité des anomalies Doppler mesurées par DopplerScatt lors de la campagne S-MODE à ce qui peut être simulé comme effet de l'âge des vagues ou de la présence de houle.

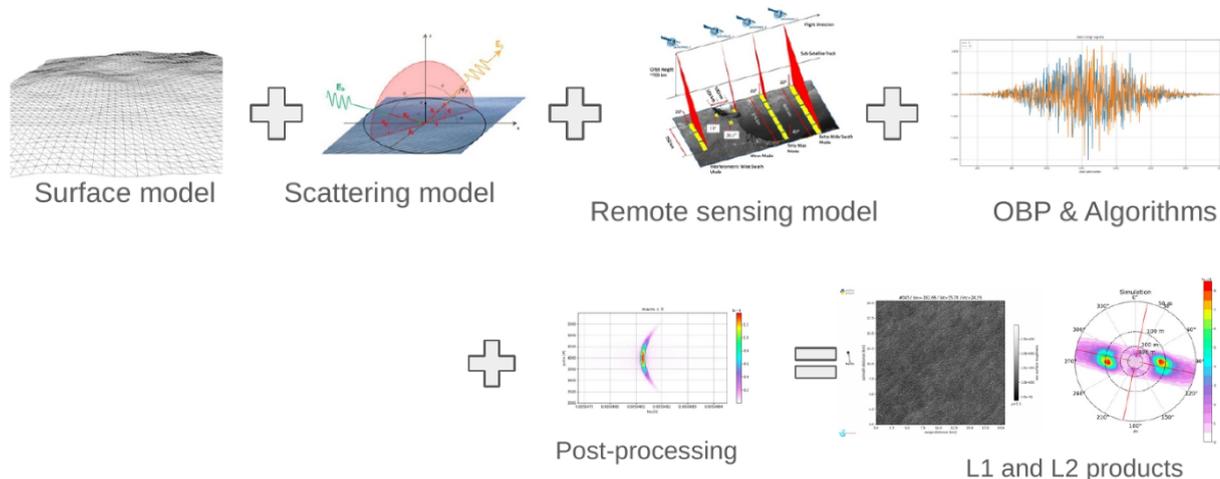


Figure 4: principe conceptuel du simulateur R3S (Nouguier 2019) qui fournit des produits de niveau 0 mais aussi de niveaux plus élevés. Les développements prévus dans le présent projet visent à rendre plus réalistes les scènes simulées. R3S est disponible sur <https://gitlab.ifremer.fr/fn05f74/r3s> et est utilisé en particulier pour la simulation de données SWOT et Harmony. (et a été utilisé pour SKIM, qui se rapproche de WaCM / STREAM-R).

#### 3.2 Mesure optique

Si la mesure optique ne permet pas une couverture systématique (présence de nuages, pas de mesure de nuit) et globale (aucun capteur optique de résolution  $< 30$  m n'a une couverture globale), elle est par contre

précieuse pour fournir une estimation des courants à haute résolution, et possiblement du cisaillement vertical, avec des mesures instantanées de la vitesse qui reposent sur le même principe que la mesure des courants par radar HF: l'utilisation de l'effet Doppler du courant sur la vitesse de phase des vagues,

$$C(\mathbf{k}) = \sqrt{g/k \tanh(kD)} + \mathbf{k} \cdot \mathbf{U} / k \quad (1)$$

avec  $\mathbf{k}$  le vecteur d'onde de norme  $k$ ,  $C$  la vitesse de phase,  $g$  la gravité,  $D$  la profondeur et  $\mathbf{U}$  le courant, supposé ici homogène sur une profondeur  $1/k$ . Dans le cas non-homogène, l'effet du courant est une convolution du profil de courant (e.g. Stewart et Joy 1974).

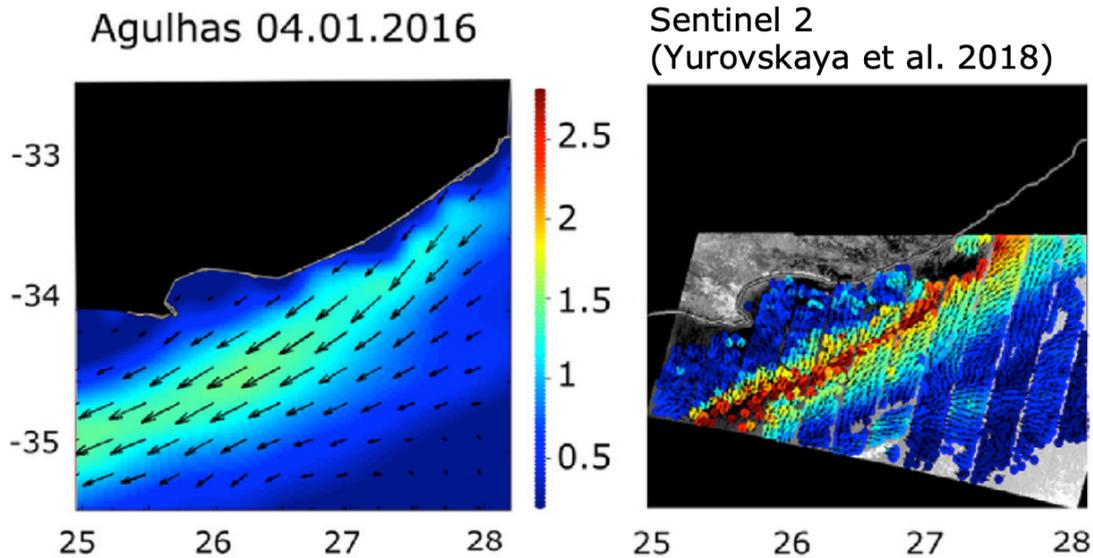


Figure 5: Exemple d'estimation du vecteur courant de surface dans le courant des Aiguilles, en comparaison avec la vitesse géostrophique estimée par la combinaison de l'anomalie de hauteur de mer avec une hauteur dynamique moyenne (tiré de Yurovskaya et al. 2018). Les artefacts visibles sous forme de bandes sont associées aux différents détecteurs du capteur MSI de Sentinel 2.

Par ailleurs, des effets non-linéaires qui ne sont pas inclus dans l'équation (1) contribuent aussi à la vitesse de phase (Bergsma & Almar 2019, Ardhuin et al. 2009).

Seulement quelques démonstrations de mesure du courant de surface ont été réalisées en utilisant au minimum 2 images géo-référencées avec une différence de temps d'acquisition de 1 à plusieurs secondes, en particulier avec Sentinel-2 (Kudryavtsev et al. 2017a,b). Par ailleurs, le même principe de mesure (dispersion des vagues) a été utilisé par Almar et al. (2019, 2021) pour estimer la bathymétrie. Dans un contexte aéroporté, des différences de temps d'acquisition plus grandes sont plus facilement accessibles, ce qui permet de faire des vidéos et de lever certaines ambiguïtés présentes quand une seule paire d'images est disponible.

En effet, Ardhuin et al. (2022) ont montré que s'il est souhaitable d'augmenter la résolution des images pour détecter des vagues plus courtes qui sont plus sensibles au courant (la différence de phase mesurée est proportionnelle à  $k \cdot U$  et donc un  $k$  plus élevé donne une plus grande différence de phase), la présence de vagues en directions opposées, qui est beaucoup plus importante pour les vagues courtes, introduit un bruit très fort sur les différences de phase.

Un début d'échange a eu lieu entre le LOPS et le LEGOS/CNES sur l'intérêt d'exploiter les travaux réalisés pour la mesure de la bathymétrie côtière à partir de Sentinel 2, Venüs et autres capteurs optiques. Nous prévoyons donc de développer une boîte à outil commune pour tester différentes solutions algorithmiques, et permettre son implémentation dans le cadre des traitements réalisés au CNES pour la bathymétrie. Les points suivants seront abordés:

- analyse du bruit de mesure sur la vitesse de phase issue du traitement S2 développé au LEGOS et implémenté sur le HPC du CNES dans une chaîne de traitement pour la bathymétrie: quel est le rôle des angles de vue et angle d'éclairement solaire? Quel est le rôle de l'état de mer? Quels sont les effets des différents traitements? On s'attachera en particulier à modéliser des scènes observées en combinant un modèle de réflexion du soleil (e.g. Kudryavtsev et al. 2017a) avec l'éclairement par le ciel. Cette compréhension du bruit est indispensable pour affiner les caractéristiques techniques de futurs instruments (CO3D, STREAM-O ou autres), par ailleurs elle peut aider à mieux guider / pondérer les analyses de données existantes et contribuer à la CAL-VAL d'un instrument radar. La définition de métriques de bruit (sur la bathymétrie ou sur les vitesses de phase) fera l'objet d'échanges en 2022 entre le LEGOS, le CNES et le LOPS (définition des paramètres a priori importants, faisabilité de leur calcul dans la chaîne de traitement bathymétrie ...), pour une analyse en 2023. Les simulations de scènes Sentinel 2 et Venus seront réalisées au LOPS entre 2022 et 2023.
- performances relatives des différents algorithmes de traitement pour l'estimation du courant (cet aspect fera l'objet d'un stage de M2 au LOPS en 2023, en collaboration avec le LEGOS)
- estimation des spectres de vagues, de leur variabilité spatiale (CDD LEGOS , 8 mois en 2024). Cette estimation sera validée par des données S-MODE (si leur analyse est effectivement financée par l'ESA avant la fin 2023). Ces résultats ainsi que les résultats des tâches 3.1, 4 et 5 alimenteront des simulations R3S complémentaires avec courant et vagues variables (CDD LOPS, 6 mois en 2025). Ce travail s'appuiera sur l'expérience du LOPS pour les spectres SAR Wave Mode (utilisation de cross-spectres, détection d'anomalie après classification des images, etc. ) ainsi que l'estimation des incertitudes associées à chaque partition du spectre.

### 3.3 Restitution du courant dans un couplage océan -vagues- atmosphère

Les simulations R3S complémentaires avec courant et vagues variables, ainsi que l'analyse des données de campagnes aéroportées (KaRADO, S-MODE) permettront de caractériser la variabilité spatiale des mesures radar et optiques. Un aspect important qui sera abordé sera l'attribution de cette variabilité à la variabilité du courant, ou à celle des vagues (modifiées localement par le courant), ou éventuellement à celle du vent (modifié localement par les vagues et le courant). Cet aspect de couplage océan -vagues- atmosphère dans les observations de courant sera mis en relation avec les modélisations prévues dans la tâche 5.

### 3.4 Activités connexes

L'activité de la tâche 3 devrait s'appuyer sur des compléments d'analyse des données de campagnes S-MODE (financement demandé à l'ESA dans le cadre de l'accompagnement STREAM): le système MASS développé par Lenain (2019, 2021) combine désormais un lidar topographique (voir aussi Villas-Boas et al. 2022) et une caméra à grand champ de vue qui permet de mesurer les courants de surface et leur cisaillement par analyse de la dispersion des vagues. Il s'agit en particulier d'obtenir des données MASS co-localisées avec Sentinel 2 / Jilin / Planet et / ou DopplerScatt et de comparer les différentes méthodes, et ensuite d'alimenter le simulateur R3S avec des gradients de vagues et courant réalistes pour regarder l'effet des gradients dans une cellule de mesure WaCM. Le financement des acquisitions aéroportées DopplerScatt et MASS est du ressort de la NASA et de l'ESA. Le financement des acquisitions d'imagerie satellite Jilin et Planet est demandé dans le cadre du présent projet.

### Tâche 4: Analyse de la circulation tropicale et cisaillement vertical

La circulation tropicale est un domaine d'intérêt majeur pour toute mission Doppler courant car c'est là que la valeur ajoutée par rapport aux systèmes d'observations actuels (altimétrie, flotteurs SVP) est la plus forte. Si le cisaillement était un point important dans le contexte de la proposition STREAM, il reste un point important car les techniques radar mesurent au plus un courant représentatif du 1er mètre proche de la surface, tandis que la plupart des autres instruments qui peuvent être utilisés pour de la CAL/VAL font des mesures en sub-surface. Par ailleurs, il est important de faire avancer cette question si on veut proposer une mission à EE12.

Pour raffiner les besoins en termes d'échantillonnage, de revisite et de précision de la mesure, il est nécessaire de mieux documenter la modulation spatiale et temporelle du cisaillement vertical des courants et de leur variabilité diurne. Cela nécessite une meilleure compréhension des processus physiques de la couche

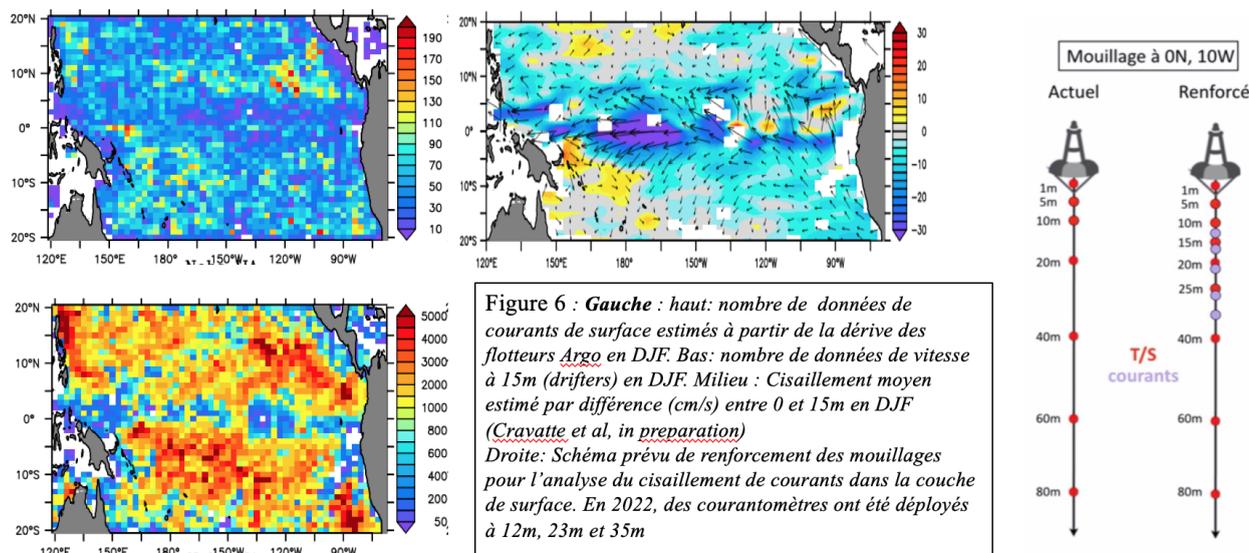
de mélange océanique qui gouvernent cette modulation. Pour cela, il est essentiel de disposer **d'un jeu de données de référence**, qui servira à la calibration de mesures satellites et à la validation et optimisation des processus simulés par les modèles numériques.

Ces actions se feront en lien avec le projet PODIOM (Pis F. Gasparin et S. Cravatte), financé par LEFE/INSU, autour d'un ensemble d'observations existantes (réseaux de mouillages TAO/TRITON dans le Pacifique, PIRATA dans l'Atlantique, drifters et flotteurs Argo) et des observations dédiées.

- Une première étude, en cours de publication, a permis de documenter le cisaillement moyen des courants de surface dans le bassin Pacifique Tropical à l'aide de l'analyse des données de drifters et de flotteurs Argo (Figure 6). Cette étude fournit **l'une des premières quantifications de la variabilité diurne et saisonnière** du cisaillement vertical à l'échelle du bassin, mais ne permet pas de considérer l'ensemble du spectre de variabilité des courants de surface.

- Dans une seconde étude, nous prévoyons donc d'analyser **les principaux mécanismes contrôlant la variabilité haute fréquence de la couche de mélange océanique** à l'aide d'une combinaison d'observations existantes (réseaux de mouillages, drifters et flotteurs Argo, données de campagnes) et d'observations dédiées. L'une des caractéristiques majeures pour étudier la modulation temporelle est de disposer de **longues séries temporelles à haute fréquence**. Lors de la campagne PIRATA 2022, grâce à du prêt exceptionnel de matériel de la DT-INSU, un renforcement de la résolution verticale des mesures de courants horizontaux dans la couche de surface a été réalisé dans l'Atlantique Équatorial Est ( $0^{\circ}, 10^{\circ}\text{W}$ ) grâce à **l'ajout de 2 courantomètres** (et de capteurs de température et salinité). Des courantomètres ont donc été déployés sur cette bouée à **12m, 23m, et 35m**, pendant une année, pour caractériser la variabilité des courants et du cisaillement vertical de courant (Figure 6) Ces mesures haute fréquence des courants (toutes les 10min) permettront de comprendre les interactions avec la stratification océanique aux échelles de variabilité horaire à saisonnière. Une telle expérience n'avait jamais été réalisée à cette longitude, où le sous-courant équatorial est plus proche de la surface qu'à  $4^{\circ}\text{N}, 23^{\circ}\text{W}$ . Elle permettra de mieux comprendre les relations entre stratification océanique et cisaillement des courants.

Sachant que les conclusions de cette première expérience seront limitées spatialement et temporellement, nous envisageons dans les prochaines années **de renforcer l'instrumentation d'autres mouillages** par le déploiement de capteurs supplémentaires, en particulier hors équateur, pour comprendre la modulation spatiale des cisaillements de courants et leur caractérisation selon différents régimes atmosphériques (vent, précipitation). Il faudrait idéalement disposer d'un pool d'instruments pour des mesures pérennes, afin d'effectuer des rotations entre mouillages, pour mesurer des cisaillements verticaux de courants dans différents régimes dynamiques. Nous proposons d'abord d'attendre les résultats de cette expérience avant de planifier de nouveaux déploiements. Le parc instrumental de la DT-INSU n'a pas le nombre de courantomètres nécessaires pour des déploiements longue durée, et le programme LEFE, à budget réduit, ne permet pas l'acquisition de tels instruments (mais contribue par ailleurs au projet), et nous demandons donc une contribution pour cet effort au CNES.



Enfin, il est nécessaire d'évaluer la représentation de principaux mécanismes de variabilité des courants de surface et du cisaillement vertical aux échelles horaires à interannuelles dans les modèles numériques. Pour cela, nous disposons d'un ensemble de simulations numériques océaniques différant par la paramétrisation du mélange vertical, et de la pénétration solaire. L'objectif est de mieux comprendre comment ces paramétrisations affectent le cisaillement vertical et les processus diurnes associés dans les modèles. Des premiers résultats indiquent que le cisaillement vertical est sous-estimé dans les simulations Mercator par rapport à ce que montrent les observations. Ce travail sera poursuivi en 2022/2024 et permettra in fine d'identifier un gain significatif des futures données STREAM (ou autre satellite mesurant les courants de surface) pour les systèmes de prévision opérationnels.

#### Tâche 5: Interactions entre vent, vagues et courants

Les études présentées brièvement dans cette section sont communes avec certaines études des projets TOSCA I-CASCADE et CARAMBA (plus de détails sont donnés dans la proposition I-CASCADE). Entre autres, elles contribuent à mettre en valeur l'importance de mesurer les courants et le stress de manière cohérente.

Les études réalisées en 2021-2022 sur le Current FeedBack (CFB) ont permis de mettre en relief l'importance du CFB dans la détermination de la dynamique de la Mer Méditerranée (voir Renault et al., 2021a) et notamment des courants intensifiés comme par exemple le courant Algérien. Dans Renault et al., 2021b, nous avons de plus testé avec succès une paramétrisation du CFB dans un modèle océanique forcé au niveau de la Californie. Les travaux de Marco Larrañaga (PhD CNES/UPS, co-encadré par L. Renault) ont de plus permis de mieux comprendre la dynamique du Golfe du Mexique et en particulier du Loop Current et des détachements de tourbillons. En particulier M. Larrañaga a pu démontrer que le CFB contrôlait en partie les caractéristiques du Loop Current et des tourbillons associés, réduisant largement les biais dans les modèles. Ses résultats ont de larges impacts non seulement d'un point de vue compréhension des phénomènes mais aussi sur la prévision océanique de cette région (oil spill, plastiques, etc). Un article est en cours de révision dans JPO (Larrañaga et al., 2022). Dans une autre thèse, Marcela Contreras a démontré que le puit d'énergie induit par le CFB au niveau du Gulf Stream était largement supérieur au puit d'énergie lié à la formation de petits tourbillons (submesoscale), ce qui remet en question des paramétrisations de dissipation d'énergie. Une étude est en cours d'écriture (Contreras et al., 2022). Dans une étude au niveau du Pacifique Est, nous avons démontré avec Lisa Maillard (étudiante en thèse) l'importance des ondes d'instabilités tropicales sur les courants grande échelle ainsi que le rôle du CFB dans leurs déterminations (Maillard et al., 2022, and in preparation). Enfin, à l'aide d'un modèle climatique couplé au 1/12° sur une période de 24 ans, nous sommes en train d'étudier à quel point les interactions fines-échelles du CFB influent non seulement sur l'Océan ((sous)mésoéchelle, courants de Bord Ouest,...) mais aussi sur le climat en altérant les masses d'eaux et ainsi les précipitations et les routes des tempêtes extra-tropicales. Dans le cadre des projets TOSCA

I-CASCADE et CARAMBA, des modèles couplés Océan-Atmosphère-Vague commencent à voir le jour. Nous notons d'ores et déjà une influence certaine des courants sur les caractéristiques des vagues (résultats présentés lors du workshop CFOSAT à Toulouse).

Bien que le windwork puisse être estimé avec des modèles couplés océan-atmosphère, **de grandes incertitudes subsistent dans son estimation à partir des observations existantes en raison du manque de mesures cohérentes du courant de surface et de la tension de vent de surface, ce qui ne permet pas de comprendre les échanges entre l'Océan et l'Atmosphère ni de contraindre correctement les modèles.** De grandes incertitudes sont aussi présentes sur les flux d'énergie dans l'océan, aussi bien géostrophiques que agéostrophiques. SWOT permettra sans aucun doute d'améliorer nos connaissances sur les flux géostrophiques. Cependant la partie agéostrophique sera toujours inconnue alors même que nous avons démontré dans Contreras et al. (2022) que cette dernière était primordiale dans la détermination des cascades d'énergie et donc des caractéristiques des courants de Bord Ouest (Voir Renault et al., 2019). Nous démontrons en outre que les cascades d'énergie sont aussi importantes dans la détermination de la dynamique équatoriale (Maillard et al., 2022), les ondes d'instabilité tropicales ayant une forte influence sur les courants moyens. Cependant ces cascades ne sont jusqu'à présent pas observées. Les mesures des courants totaux de SWOT nous permettraient ainsi de monitorer ces cascades en global et donc non seulement de mieux comprendre leurs caractéristiques et rôles dans l'Océan mais aussi de mieux contraindre et valider nos modèles. De plus, jusqu'à présent, l'interface des vagues entre l'atmosphère et l'océan n'a pas été explicitement incluse dans les modèles couplés à haute résolution. On suppose généralement un état de mer équilibré, transparent aux transferts de quantité de mouvement entre les deux milieux - le transfert de quantité de mouvement vers le champ de vagues est immédiatement transmis à l'océan, et vice versa. Cette hypothèse néglige les mécanismes de rétroaction possibles vers l'atmosphère et l'océan associés à un état de mer non équilibré (par exemple, les changements de la rugosité de la surface de l'océan, la redistribution spatio-temporelle du flux de momentum atmosphérique, l'advection de Stokes, la turbulence de Langmuir). **Un enjeu particulier pour la proposition WaCM est à la fois de comprendre comment les rétroactions vent-vagues-courant contribuent aux ambiguïtés des observations de NRCS et DC (cf. tâche 3) mais aussi à mieux comprendre comment des observations peuvent contraindre le système couplé océan-atmosphère de l'échelle de la cellule de mesure radar à l'échelle globale.** En particulier, il est important de comprendre quelle part de la variabilité des vents et courants est observable par une mission spatiale. Actuellement, de nombreuses incertitudes demeurent notamment sur la réponse en tension de vent et vent aux courants de surface, les flux d'énergie dans l'océan qui ne seront que partiellement observables avec SWOT (il manquera la partie agéostrophique), et le transfert d'énergies à (sous)mésoéchelle vers l'atmosphère. **L'observation cohérente spatialement et temporellement des courants et des vents est nécessaire afin de mieux comprendre ces processus et de mieux contraindre nos modèles.**

Pour surmonter ces problèmes, nous aurons accès à différentes simulations couplés océan-atmosphère-vagues sur les régions suivantes:

- Gulf Stream à sous-mésoéchelle couplée Océan-Atmosphère-Vague (5 ans, projet I-CASCADE et PhD de M. Contreras et G. Henaff co-encadrés par L. Renault)
- Californie à sous-mésoéchelle couplée Océan-Atmosphère (1 an, simulations de L. Renault, pourraient aussi servir à S-MODE)
- Golfe du Mexique à mésoéchelle couplée Océan-Atmosphère-Vague (20 ans, PhD de M. Larrañaga co-encadré par L. Renault)
- Caraïbes à sous-mésoéchelle couplée Océan-Atmosphère-Vague (entre 1 et 5 ans, postdoc de C. Conejero, encadré par L. Renault)
- Méditerranée couplée Océan-Atmosphère-Vague (étude en cours de L. Renault et future postdoc Shom)
- Pacifique Tropicale Est couplée Océan-Atmosphère (5 ans, runs d'ensemble, PhD de L. Maillard co-encadré par L. Renault)
- Globale au 1/12 couplée Océan-Atmosphère (24 ans), collaborations de L. Renault avec le BSC en Espagne.
- Globale à 4km (collaboration de L. Renault avec Caltech/JPL aux États-Unis).

Ces simulations nous permettront de

1. Générer des données WaCM synthétiques pour déterminer ce qui peut être déduit des futures données WaCM, en se concentrant en particulier sur le windwork, les flux d'énergie dans l'océan, et les coefficients de couplage en vent et tension de vent
2. D'étudier l'impact du CFB sur l'activité à sous-mésoéchelle ainsi que sur la dynamique des courants tropicaux (là où l'on ne dispose que de peu d'informations) et du Golfe du Mexique
3. D'étudier à quel point nous avons besoin d'une approche "vagues-océan-atmosphère" totalement cohérente, comprenant un ensemble complet d'équations de modèles océaniques moyennées par les vagues et une rétroaction de l'état de la mer sur l'atmosphère ? Nous chercherons à déterminer quelle physique doit être représentée dans les modèles, c'est-à-dire quelles composantes des modèles couplés sont nécessaires pour reproduire les courants océaniques de surface surveillés par WaCM
4. D'évaluer l'impact du couplage vagues-atmosphère sur le travail du vent (par le changement de la rugosité, de la couche limite atmosphérique et du vent à basse altitude) entre l'atmosphère et l'océan (à grande échelle et à l'échelle des tourbillons) et les rétroactions sur les champs de vagues et sur la circulation océanique
5. D'étudier l'impact climatique de l'interaction entre les courants de surface et l'atmosphère (CFB) : Il s'agit ici d'un impact indirect du CFB qui n'a jamais été démontré jusqu'à présent. Le CFB diminue l'activité tourbillonnaire, ce qui altère les caractéristiques des courants de Bord-Ouest et les masses d'eaux associées. En altérant les gradients de température au niveau du Gulf Stream et du Kuroshio, les storm-tracks extratropicales ainsi que les précipitations devraient être impactées. De ce fait, une meilleure observation des courants de surface et de la tension de vent amélioreraient indirectement notre compréhension des phénomènes climatiques.
6. Étudier l'impact des courants de surface sur les flux turbulents de chaleur. D'autres missions satellites visent à mesurer les flux turbulents de surface. Cependant sans l'information des courants cette estimation peut s'avérer biaisée. Nous déterminerons quelle erreur est faite en ignorant les courants de surface dans l'estimation de ces flux.
7. D'évaluer à quel point les futures données de vent WaCM seront utiles pour forcer un modèle océanique.

Une mise à jour de certains diagnostics pourra être réalisée en 2025 en utilisant un nouveau modèle d'erreur issue de la tâche 3.

## RESSOURCES ET CALENDRIER PREVISIONNEL DE LA PROPOSITION

Afin de faciliter le lien avec le paragraphe précédent, les demandes budgétaires sont d'abord présentées par tâche et par année. Un tableau récapitulatif à la fin donne une présentation par laboratoire (LOPS, LEGOS, IETR), en cohérence avec les demandes budgétaires faites sur le site [apr.cnes.fr](http://apr.cnes.fr)

### Tâche 1: Organisation de la communauté scientifique

#### En 2023

- Missions pour participer au TPOS Scientific Advisory Committee (S. Cravatte, **LEGOS**); ce comité scientifique s'assure de l'implémentation du système d'observation intégré (complémentarité satellites + in situ) dans le Pacifique Tropical, et propose des évolutions de ce système d'observations.: 2.8 k€ (2023)
- Missions pour participer au comité de pilotage PIRATA (Atlantique Tropical) et promouvoir la mission WaCM (F. Gasparin, 2k€, **LEGOS**)
- Réunions du groupe mission WaCM (2 personnes: F. Arduin et S. Cravatte ou L. Renault) : 3 k€ **LOPS** et 3 k€ **LEGOS**

#### En 2024

- organisation d'un workshop en France : 7 k€ **LOPS**
- 2 présentations au colloque international Ocean Sciences Meeting (New Orleans): 3 k€ **LOPS** 3k€ **LEGOS**
- Missions pour participer au TPOS Scientific Advisory Committee (S. Cravatte, **LEGOS**) 2.8 k€

- Missions pour participer au comité de pilotage PIRATA (Atlantique Tropical) (F. Gasparin, **LEGOS**, 2k€)
- frais de publication d'un synthèse sur les projets et l'avancement de la mission WaCM: 2 k€ (**LOPS**)

#### En 2025

- Missions pour participer au TPOS Scientific Advisory Committee (S. Cravatte, **LEGOS**) 2.8 k€
- 2 présentations au ESA Living Planet Symposium 2 k€ **LOPS** 2 k€ **LEGOS**

#### Tâche 2: Développement du capteur ASWIM (Advanced Sensor for ocean Winds measurements - Capteur avancé pour la mesure du vent océanique) et mesures aéroportées (S. Méric et L. Marié)

#### En 2023

Les moyens demandés sont de deux ordres : le premier concerne un investissement matériel pour réaliser le système radar et le second aborde les campagnes de mesure. Le tout est concentré sur l'année 2023 afin de fournir un capteur pour fin 2023 et pour être en phase avec la thèse d'Erwan Rahault.

**Réalisation du capteur ASWIM** : Le travail de thèse a déjà identifié une structure du capteur ASWIM et les montants indiqués sont donnés pour un ordre de grandeur. Ils proviennent de premiers devis obtenus et doivenous avons obtenu des devis en conséquence :

- (1) Numériseur enregistreur rapide de signaux radar PXI : 20 k€
- (2) Générateur RF permettant la génération/modulation de signaux radar en bandes Ka : 130 k€
- (3) Stockage SSD spécifique PXI : 9 k€
- (4) Châssis PXI recevant l'ensemble des éléments : 7 k€
- (5) Contrôleur PXI de commande des éléments PXI : 6 k€
- (6) Organe de commande embarqué : 10 k€

De même, il faut aussi considérer la réalisation du système de positionnement multi-angulaire : 2 k€

Concernant l'antenne radar, le travail de conception est fait en parallèle de l'intégration des éléments ci-dessus. Les éléments de dépenses associés à la collaboration avec SWISSto12 ainsi que l'adaptation d'un système de positionnement sont :

- (1) réalisation de l'antenne polarimétrique : 5 k€
- (2) réalisation des mesures de l'antenne polarimétrique : 2 k€

Il est prévu que le capteur ASWIM soit disponible pour **fin premier semestre 2023 (juillet 2023)**. Pour cela, les achats de matériels devront être réalisés avant fin 2022.

**Campagnes de mesures aéroportées** : cet aspect concerne les moyens nécessaires à l'expérimentation (intégration et vols). Les vols correspondants doivent essentiellement vérifier que le capteur ASWIM présente les performances attendues :

- 2 jours de campagne avec intégration : 3 k€
- Missions associées : 2 k€

Il est prévu que les campagnes de mesure soient réalisées et interprétées fin **2023 (décembre 2023)**.

Sur ces demandes, il est prévu des missions de participation à des colloques : 2 k€

**TOTAL (2023 IETR) : 198 k€**

#### En 2024

une campagne océanographique côtière utilisant ASWIM sera organisée par le LOPS:

Besoins financiers spécifiques à la campagne:

Missions + carburant PIMA: 10 k€ (**IETR**).

Accastillage pour mouillage : 5 K€ (**LOPS**)

Bouées dérivantes CARTHE: 10 k€ (**LOPS**)

frais de publication sur le capteur ASWIM et ses performances: 2,5 k€ (**IETR**)

présentation à une conférence internationale (IGARSS ...): 3 k€ (**IETR**)

**TOTAL : 15,5 k€ (IETR) 15 k€ (LOPS)**

**En 2025**

exploitation des données de campagne, frais de publication: 2,5 k€ (**LOPS**)  
*nous envisageons d'utiliser ASWIM sur une campagne d'opportunité, possiblement sur un avion SAFIRE, mais il est encore un peu tôt pour chiffrer cet aspect qui pourra par ailleurs être prise en charge dans une phase A / phase 0.*

**Tâche 3: physique de la mesure et algorithmes d'inversion****En 2023**

stage 6 mois M2, comparaison des méthodes d'estimation du courant par imagerie optique: 3.6 k€ (**LOPS**)  
 1 acquisition Jilin et une acquisition Planet: 12 k€ (**LEGOS**)  
 réunions à Brest (mission pour 2 personnes: R. Almar & E. Bergsma) et Toulouse (mission pour 2 personnes, F. Arduin & N. Rasclé) : 1,2 k€ **LOPS** , 1,2 k€ **LEGOS**  
 jouvence pc portable Linux (F. Arduin): 2 k€ (**LOPS**)  
 frais de publication : 3 k€ (**LEGOS**)  
 mission pour une conférence internationale: 3 k€ (**LEGOS**)

**En 2024**

1 acquisition Jilin et une acquisition Planet: 12 k€ (**LEGOS**)  
 missions Toulouse et Brest : 1,2 k€ **LOPS** , 1,2 k€ **LEGOS**  
 frais de publication : 3 k€ (**LEGOS**)  
 mission pour une conférence internationale: 3 k€ (**LOPS**)  
 8 mois CCD niveau IR au LEGOS pour la tâche 3.2: spectres de vagues et intégration vagues et courant dans une chaîne de production "imagerie côtière"

**En 2025**

1 acquisition Jilin et une acquisition Planet: 12 k€ (**LEGOS**)  
 missions Toulouse et Brest : 1,2 k€ **LOPS** , 1,2 k€ **LEGOS**  
 frais de publication : 3 k€ (**LOPS**)  
 6 mois CDD IE au LOPS: simulations de scènes radar avec R3S (tâche 3.1), prenant en compte les gradients d'état de mer (tâche 3.2), et utilisant des simulations de la tâche 5.

**Tâche 4: Analyse de la circulation tropicale et cisaillement vertical****En 2023**

- Une publication sur les résultats en: 2.5 k€ (**LEGOS**)
- Une mission de collaboration Nouvelle-Calédonie-France 3 k€ (**LEGOS**)
- Une mission pour présenter les résultats dans un congrès international (AGU/EGU ... ): 2.5 k€ (**LEGOS**)
- Un ordinateur portable : 2.5 k€ (**LEGOS**)
- Deux courantomètres aquadopps pour équiper les mouillages et mesurer la variabilité temporelle du cisaillement vertical des courants de proche surface. Le devis (incluant l'Aquadopp, le pack de batterie, le système de fixation sur la ligne de mouillage et les frais de transport vers Brest s'élèvent à 12.2 k€) soit un total de **24.4 k€** pour deux instruments.

TOTAL: 34.9 k€ (**LEGOS**)

**En 2024**

- Deux publications sur les résultats en 2024: 5 k€
- Une mission de collaboration Nouvelle-Calédonie-France (2024): 3 k€
- Deux missions pour présenter les résultats dans un congrès international (2024): 5 k€

TOTAL: 13 k€ (**LEGOS**)

**Tâche 5: Modélisation numérique de l'interactions entre vent, vagues et courants**

Plusieurs financements seront nécessaires (participation à des colloques, visite à des collègues européens et américains, notamment à CalTECH), dont :

**En 2023**

- Un Ingénieur de Recherche (IR, 55k€) pour un an est demandé afin de paralléliser et améliorer des scripts existants. En particulier les travaux s'articuleront autour de quatre tâches principales de post-processing qui sont primordiales pour démontrer l'importance de mesure les courants et les vents de manière cohérente, à savoir:

1) Génération de données synthétiques WaCM. A partir des simulations régionales (Californie, Gulf Stream, Courant des Aiguilles, Mer Méditerranée, Golfe du Mexique, Caraïbes, et Pacifique Sud Est) et globales (1/12 NEMO-IFS sur 30 ans ainsi que le MIT-gcm couplé en collaboration avec Caltech), nous souhaitons générer des données synthétiques WaCM afin de pouvoir inter-comparer ces données à nos simulations couplées. En particulier, nous analyserons les transferts d'énergie dans l'océan, les coefficients de couplage, les transferts d'énergie Océan-Atmosphère, et les caractéristiques des tourbillons. Pour cela, nous avons de plus besoin de développer les trois autres tâches décrites ci-dessous.

2) Nous utilisons l'approche dite de "coarse-graining" afin d'évaluer les flux d'énergie dans l'océan. Cette approche prometteuse permet de cartographier les flux d'énergie à différentes échelles. Cela nous permet non seulement de mieux comprendre la dynamique de l'Océan mais aussi d'évaluer la partie des flux qui sera effectivement mesurée par WaCM. Ce diagnostic a été utilisé au niveau du Gulf Stream sur une petite configuration. Nous souhaitons généraliser le script et l'améliorer en le parallélisant afin de réduire son coût de calcul et surtout de pouvoir l'appliquer à d'autres régions.

3) Le couplage mécanique entre l'océan et l'atmosphère peut être caractérisé par des coefficients de couplage et le travail du vent (le windwork). Nous souhaitons là aussi améliorer des scripts existants afin de les rendre plus performants et de les unifier dans une toolbox dans un seul langage (Python). Pour le moment les coefficients de couplage sont estimés avec IDL.

4) Développer des scripts de pre-processing pour le traçage des tourbillons. Nous avons mis en place un eddy-tracking pour le Golfe du Mexique. Nous avons maintenant besoin de généraliser les scripts de post-processing afin de déterminer les caractéristiques des tourbillons et l'impact des différents couplages sur leurs caractéristiques.

- Une mission en Californie à Caltech (14 jours, L. Renault): 5 k€
  - Un meeting international en(7 jours): 3 k€
  - Deux missions pour des étudiants en Europe de 7 jours : 3 k€
  - Une mission pour un colloque international pour un étudiant sur le thème du couplage océan/atmosphère/vagues 2.5 k€
  - Deux publications sur les résultats en: 5 k€
  - Un ordinateur portable en: 2 k€
- Total : 20.5 k€ (**LEGOS**) + **CDD IR 12 mois (55k€)**

#### **En 2024 :**

- Deux publications sur les résultats en 2024: 5 k€
- Une mission aux Etats-Unis pour deux personnes d'une durée de deux semaines : 10 k€
- Deux missions pour présenter les résultats dans un meeting international (2024): 5 k€
- Deux missions dans des laboratoires français (LOPS et LOCEAN, 2024) d'une semaine: 2k€

Selon l'avancement des travaux, je demanderai éventuellement un demi-financement de thèse à travers l'appel d'offre CNES et/ou une prolongation de 6 mois de l'IR.

Total 22 k€ (**LEGOS**)

#### **Récapitulatif des demandes financières pour 2023:**

LOPS (tâches 1, 2, 3): 3 k€ (tâche 1), 6,8 k€ (tâche 3)

IETR (tâche 2) : 198 k€

LEGOS (tâches 1, 3, 4, 5): 7,8 k€ (tâche 1) 19,2 k€ (tâche 3) 34.9 k€ (tâche 4) 20.5 k€ (tâche 5)  
+ CDD IR 12 mois (outils simulations CROCO)

**La somme de ces moyens est importante (293 k€ + 12 mois de CDD), et à la hauteur de l'ambition de jouer un rôle important dans la mission WaCM et d'être en capacité de proposer une mission au 12ème Earth Explorer de l'ESA. Il s'agit d'être capable d'accompagner des phases 0 et phase A avec l'indispensable capacité de mesure aéroportée.**

Les moyens humains mobilisés sont eux aussi importants, avec des cofinancements significatifs (par exemple les projets ESA IASCO et ESA-STREAM) avec une synergie importante avec d'autres travaux (par exemple sur la mission SWOT). Enfin, nous rappelons que l'importance du cisaillement vertical à l'équateur est de nature à profondément modifier les flux air-mer et le mélange suivant la profondeur à laquelle le courant est mesuré. Il est donc très important de quantifier ce cisaillement in situ avant de simuler sa signature dans les observations aéroportées ou satellites.

Pour les années suivantes, nous envisageons un budget nettement plus réduit:

**Budget indicatif pour 2024:**

LOPS (tâches 1, 2, 3): 12 k€ (tâche 1) , 15 k€ (tâche 2), 4,2 k€ (tâche 3)

IETR (tâche 2) : 15,5 k€

LEGOS (tâches 1, 3, 4, 5): 11,8 k€ (tâche 1) 15 k€ (tâche 3) 34,9 k€ (tâche 4) 20,5 k€ (tâche 5)  
+ CDD 8 mois (spectres de vagues et intégration vagues et courant dans une chaîne de production "imagerie côtière")

**Budget indicatif pour 2025:**

LOPS (tâches 1, 2, 3): 2 k€ (tâche 1) 2,5 k€ (tâche 2) , 4,2 k€ (tâche 3)  
+ CDD IE 6 mois (simulations R3S "réalistes")

IETR (tâche 2) : 0 k€

LEGOS (tâches 1, 3, 4, 5): 4,8 k€ (tâche 1) 12 k€ (tâche 3)

**PUBLICATIONS**

Almar, R.; Bergsma, E.W.J.; Catalan, P.A.; Cienfuegos, R.; Suarez, L.; Lucero, F.; Nicolae Lerma, A.; Desmazes, F.; Perugini, E.; Palmsten, M.L.; Chickadel, C. Sea State from Single Optical Images: A Methodology to Derive Wind-Generated Ocean Waves from Cameras, Drones and Satellites. *Remote Sens.* 2021, 13, 679. <https://doi.org/10.3390/rs13040679>

Ardhuin, F., Marié, L., Rasclé, N., Forget, P., & Roland, A. (2009). Observation and Estimation of Lagrangian, Stokes, and Eulerian Currents Induced by Wind and Waves at the Sea Surface. *Journal of Physical Oceanography*, 39(11), 2820–2838. doi:10.1175/2009jpo4169.1

Ardhuin, F., Alday, M., & Yurovskaya, . (2021). Total surface current vector and shear from a sequence of satellite images: Effect of waves in opposite directions. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2021JC017342. <https://doi.org/10.1029/2021JC017342>

Ardhuin F, Brandt P, Gaultier L, Donlon C, Battaglia A, Boy F, Casal T, Chapron B, Collard F, Cravatte S, Delouis J-M, De Witte E, Dibarboure G, Engen G, Johnsen H, Lique C, Lopez-Dekker P, Maes C, Martin A, Marié L, Menemenlis D, Nougier F, Peureux C, Rampal P, Ressler G, Rio M-H, Rommen B, Shutler JD, Suess M, Tsamados M, Ubelmann C, van Sebille E, van den Oever M and Stammer D (2019) SKIM, a Candidate Satellite Mission Exploring Global Ocean Currents and Waves. *Front. Mar. Sci.* 6:209. doi: 10.3389/fmars.2019.00209

Bergsma, E.W.J.; Almar, R. Video-Based Depth Inversion Techniques, a Method Comparison with Synthetic Cases. *Coast. Eng.* 2018, 138, 199–209

Cesbron G, Melet A, Almar R, Lifermann A, Tullot D and Crosnier L (2021) Pan-European Satellite-Derived Coastal Bathymetry—Review, User Needs and Future Services. *Front. Mar. Sci.* 8:740830. doi: 10.3389/fmars.2021.740830

Contreras M., Renault L., Marchesiello P.: "Understanding Energy Pathways in the Gulf Stream". To be submitted to *Journal of Physical Oceanography*

ESA, 2019. Report for Mission Selection, SKIM.

Kessler, W.S., S. Cravatte and Lead Authors, 2021: Final Report of TPOS 2020. GOOS-268, 83 pp. [Available online at <https://tropicalpacific.org/tpos2020-project-archive/reports/>]

Kudryavtsev, V., M. Yurovskaya, B. Chapron, F. Collard, and C. Donlon (2017), Sun glitter imagery of oceansurface waves. Part 1: Directionalspectrum retrieval and validation, *J. Geophys. Res. Oceans*, 122, 1369–1383, doi:10.1002/2016JC012425

Larrañaga M., Renault L., Jouanno J. (2022). “Partial Control of the Loop Current Dynamics by Mechanical Air-Sea Coupling”. Submitted to *Journal of Physical Oceanography* (in revision)

Lenain, L., N. M. Statom, and W. K. Melville, 2019b: Airborne measurements of surface wind and slope statistics over the ocean. *J. Phys. Oceanogr.*, 49, 2799–2814, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-19-0098.1>

Lenain, L., Pizzo, N., 2021, Modulation of Surface Gravity Waves by Internal Waves, <https://doi.org/10.1175/JPO-D-20-0302.1>

Lévy, M., Ferrari, R., Franks, P. J. S., Martin, A. P., & Rivière, P. (2012). *Bringing physics to life at the submesoscale. Geophysical Research Letters*, 39(14), n/a–n/a. doi:10.1029/2012gl052756

Marié, L., Collard, F., Noguier, F., Pineau-Guillou, L., Hauser, D., Boy, F., Méric, S., Sutherland, P., Peureux, C., Monnier, G., Chapron, B., Martin, A., Dubois, P., Donlon, C., Casal, T., and Arduin, F.: Measuring ocean total surface current velocity with the KuROS and KaRADOc airborne near-nadir Doppler radars: a multi-scale analysis in preparation for the SKIM mission, *Ocean Sci.*, 16, 1399–1429, <https://doi.org/10.5194/os-16-1399-2020>, 2020

Noguier, F., C.-A. Guérin, and B. Chapron (2009), “Choppy wave” model for nonlinear gravity waves, *J. Geophys. Res.*, 114, C09012, doi:10.1029/2008JC004984.

Noguier, F., Chapron, B., Collard, F., Mouche, A. A., Rasclé, N., Arduin, F., & Wu, X. (2018). *Sea Surface Kinematics From Near-Nadir Radar Measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1–11. doi:10.1109/tgrs.2018.2833200

Noguier, 2019. SKIM-MPRC-TN6 SKIM-MPRC TN-6: Remote Sensing Spatial Simulator (R3S), DOI: 10.13140/RG.2.2.21423.97440

Renault, L., Arsouze, T., & Ballabrera-Poy, J. (2021a). On the influence of the current feedback to the atmosphere on the Western Mediterranean Sea dynamics. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(1), e2020JC016664.

Renault, L., McWilliams, J. C., Kessouri, F., Jousse, A., Frenzel, H., Chen, R., & Deutsch, C. (2021b). Evaluation of high-resolution atmospheric and oceanic simulations of the California Current System. *Progress in Oceanography*, 195, 102564.

Maillard L., Boucharel J. and Renault L.: “Direct and Rectified effects of Tropical Instability Waves on the eastern tropical Pacific mean state in a regional ocean model”. Submitted (revised version).

Yurovskaya, M., Rasclé, N., Kudryavtsev, V., Chapron, B., Marié, L., & Molemaker, J. (2018). *Wave spectrum retrieval from airborne sunglitter images. Remote Sensing of Environment*, 217, 61–71. doi:10.1016/j.rse.2018.07.026

Yurovskaya, M., Kudryavtsev, V., Chapron, B., & Collard, F. (2019). Ocean surface current retrieval from space: The Sentinel-2 multispectral capabilities. *Remote Sensing of Environment*, 234, 111468. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111468>

