

GROUPE THEMATIQUE OCEAN

Fabrice Arduin (expert invité), Nadia Ayoub, Marcel Babin (expert invité), Pascal Bonnefond, Jacqueline Boutin, Aurélien Carbonniere (responsable de thème Côtier/Cryosphère entrant), Hervé Claustre, Gérald Dibarbouré (expert invité), Francesco D'Ovidio, Yann Drillet, Ronan Fablet (expert invité), Yannice Faugère (responsable de thème Océan entrant), Sara Fleury (expert invité), Cedric Jamet, Alexei Kouraev, Pierre-Yves Le Traon (président Groupe Océan), Marina Lévy (expert invité), Anne Lifermann (responsable de thème Côtier/Cryosphère sortante), Hubert Loisel (expert invité), Bertrand Lubac, Angélique Melet (expert invité), Benoit Meyssignac (expert invité), Rosemary Morrow (expert invité), Frédéric Nougier, Annick Sylvestre-Baron (responsable de thème Océan sortante).

Table des matières

1. Grandes tendances en océanographie	2
1.1. TP1 : Le climat.....	2
1.2. TP2 : Le côtier et le littoral	3
1.3. TP3 : Les fines échelles spatio-temporelles	5
1.4. TP4 : La biogéochimie et l'écologie marine.....	7
1.5. TP5 : Les zones polaires	8
1.6. TT1 : L'océanographie opérationnelle.....	10
1.7. TT2 : L'intelligence artificielle	12
2. Retours sur les priorités 2019 vis-à-vis des missions spatiales	13
3. Algorithmie, exploitation des données et pôles de données	16
4. Activités cal/val et observations in-situ	18
5. Accompagnement de la recherche spatiale	19
Annexe 1 : bilan des projets APR, post docs et thèses	20
Annexe 2 : Publications principales de la communauté TOSCA / Océan	25

1. GRANDES TENDANCES EN OcéANOGRAPHIE

La prospective TOSCA/Océan de 2019 avait identifié cinq Thèmes Principaux (TP) pour les grandes tendances en océanographie pour la prochaine décennie et deux Thèmes Transverses (TT) :

- TP1 : Le climat
- TP2 : Le côtier et le littoral
- TP3 : Les fines échelles spatio-temporelles
- TP4 : La biogéochimie et l'écologie marine
- TP5 : Les zones polaires
- TT1 : L'océanographie opérationnelle
- TT2 : L'intelligence artificielle

Un bilan des thèmes principaux et transverses est donné ci-dessous en se focalisant sur les avancées scientifiques, l'apport du spatial et de la communauté scientifique nationale. Ces thèmes ne sont pas bien sûr indépendants. Les travaux menés par la communauté ont été rattachés à un thème principal bien que concernant souvent plusieurs thèmes. Plusieurs sujets de recherche sur la biogéochimie (TP4) sont, par exemple, aussi focalisés sur les fines échelles (TP3) et les zones côtières (TP2). La recherche sur les zones polaires (TP5) concerne aussi le climat (TP1) et la biogéochimie (TP4).

1.1. TP1 : LE CLIMAT

Les données spatiales jouent un rôle essentiel pour l'étude des grands cycles climatiques, le suivi de l'efficacité des politiques d'atténuation et la mise en œuvre de mesures d'adaptation au changement climatique. Au cours des 5 dernières années, la communauté scientifique française a apporté des contributions de tout premier plan sur l'analyse et l'interprétation des données altimétriques combinées aux données gravimétriques et in-situ pour le suivi du niveau moyen des mers et du déséquilibre énergétique de la planète.

L'extension de la série d'altimétrie de précision (T/P, Jason-1, 2 et 3) avec le lancement de Sentinel-6 en novembre 2020 et les efforts continus de retraitement des données passées, d'amélioration des algorithmes et de caractérisation des erreurs a permis de mettre en évidence une accélération nette (environ 0,08 mm/an²) de la montée du niveau moyen des mers qui atteint maintenant plus de 4 mm/an (Cazenave et Moreira, 2022) (Fig. 1).

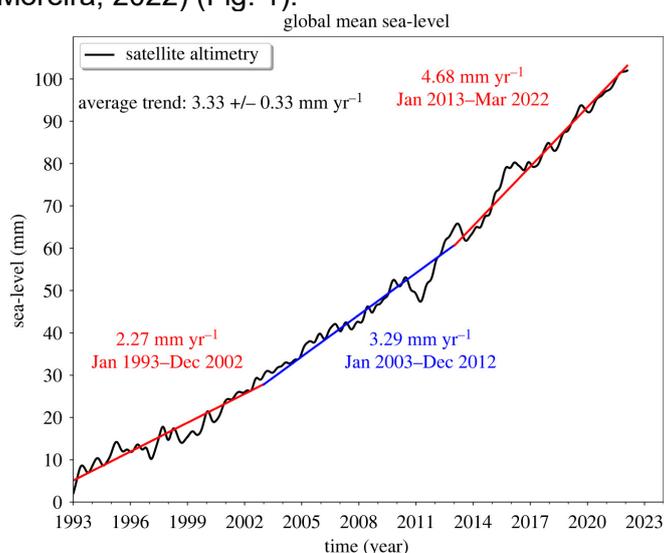


Fig. 1 : Evolution du niveau moyen des mers de 1993 à 2022 (Cazenave et Moreira, 2022).

Un travail détaillé a été mené pour mieux caractériser les propagations des incertitudes en altimétrie (Ablain et al. 2019, Prandi et al. 2022, Guerou et al. 2023) afin d'estimer de manière robuste et

précise les incertitudes sur le niveau de la mer. Aujourd'hui l'incertitude (à 90% d'intervalle de confiance) sur les tendances du niveau moyen des mers est de $\pm 0,3$ mm/an et de $\pm 0,05$ mm/an² pour son accélération sur les 30 années de l'enregistrement altimétrique. Des améliorations ont été apportées avec notamment un retraitement des mesures radiométriques qui ont conduit à une amélioration des observations Jason-3 (Barnoud et al. 2023).

Combinées aux données Argo corrigées de la dérive en salinité depuis 2017, et à la nouvelle version des données de gravimétrie spatiale (GRACE et GRACE-FO), les données altimétriques permettent de fermer le bilan du niveau de la mer sur la période complète 1993-2022 (Barnoud et al. 2022). La fermeture du bilan du niveau de la mer confirme l'accélération significative de son élévation à l'échelle globale depuis 1993 et montre que cette accélération est essentiellement due à une perte de masse accélérée des calottes polaires du Groenland et de l'Antarctique.

Les données altimétriques combinées avec les données de gravimétrie spatiale sont aussi utilisées pour évaluer la quantité de chaleur stockée dans l'océan en réponse au changement climatique et permettent aujourd'hui de mesurer directement par géodésie l'évolution temporelle du déséquilibre énergétique de la Terre aux échelles de temps interannuelles et plus longues (Marti et al. 2022). Sur des échelles de temps de 5 ans et plus, ces observations sont en accord avec les estimations moyennes du déséquilibre énergétique faites par le réseau Argo. En interannuel, elles sont en accord avec les variations interannuelles du bilan radiatif mesurées par CERES en haut de l'atmosphère.

1.2. TP2 : LE COTIER ET LE LITTORAL

L'océan côtier peut-être défini comme la région où la dynamique océanique est fortement contrainte par les variations de la bathymétrie liées au plateau continental. Les zones côtières dont il est question ici incluent donc les zones littorales où la dynamique est influencée principalement par les ondes de gravité (vagues et marée) et les échanges terre-mer, le plateau et le talus (propice à la génération de marée interne), ainsi que les lagons. Elles comprennent également les estuaires, deltas et lagunes qui sont des zones critiques pour les échanges d'eau, de matière, de constituants biologiques et d'éléments chimiques entre continent et océan et constituent à ce titre des régions clés pour les écosystèmes et les sociétés humaines. Dans le contexte des changements globaux, il est essentiel d'évaluer, comprendre et surveiller la vulnérabilité de ces systèmes. Les données satellitales se révèlent être un outil essentiel pour une approche à la fois locale et des fines échelles mais également globale, permettant ainsi d'appréhender la diversité géographique de ces systèmes et des enjeux sociétaux et économiques associés.

Les mesures spatiales pour l'observation côtière regroupent principalement l'altimétrie et la couleur de l'océan. De nombreuses études ont été effectuées dans le cadre de la mission spatiale SWOT et dans le cadre des nouvelles observations liées à la couleur de l'océan à moyenne (OLCI/Sentinel-3) et haute résolution spatiale (MSI/Sentinel-2).

Pour les études en couleur de l'océan, un projet fédérateur piloté par le LOG (LOV, MMS, IFREMER, EPOC, LISIC, SMEL) a permis d'évaluer différents algorithmes de correction atmosphérique et bio-optiques pour l'étude de la variabilité spatio-temporelle de paramètres biogéochimiques tout autour des côtes de la France (hors les Outre-Mer), mais également de commencer à mettre au point un cadre méthodologique afin de tirer profit de la combinaison des mesures in situ délivrées par les services d'observations, et les données satellites couleur de l'eau. Ce travail a été transféré au pôle ODATIS dans le cadre du Consortium d'Expertise Scientifique sur la couleur de l'eau du pôle (<https://www.odatis-ocean.fr/activites/consortium-dexpertise-scientifique/ces-couleur-de-locean>). Les produits 'moyenne résolution' (MERIS, MODIS, OLCI) seront diffusés par le Centre de Données et de Service AVISO du pôle ODATIS. ACRI-ST a aussi développé une plateforme d'accès simplifié pour la communauté d'utilisateurs ODATIS (<https://odatis.acri-st.fr/geobrowser>). En parallèle, la société Magellium intègre des algorithmes côtiers pour les capteurs haute-résolution (Sentinel-2) dans un environnement exploratoire hébergé sur le HPC du CNES. D'autres études ont permis de développer et valider, à partir de mesures in-situ, des algorithmes de correction atmosphérique et

bio-optiques pour les estuaires et les zones arctiques. Enfin, des travaux ont continué pour promouvoir le développement d'un satellite hyperspectral côtier.

La bathymétrie et l'évolution du trait de côte sont des paramètres clés de l'étude des environnements côtiers. Les études menées dans le cadre du TOSCA ont conduit à des avancées majeures sur les méthodes d'estimation de la bathymétrie et de la topographie en zones intertidales dérivée des images des missions Sentinel-1, Sentinel 2, Venus, Pléiades et Landsat (e.g. Bergsma et Almar, 2020; Salameh et al., 2020 ; Khan et al., 2020 ; Cesbron et al., 2021). Celles-ci ouvrent maintenant la voie à un suivi global de la bathymétrie des zones côtières et de son évolution dynamique. L'évolution du trait de côte est également suivie maintenant de façon quasi-opérationnelle à partir des mesures satellitales (e.g. Laignel et al., 2023). Les travaux de Salameh et al., (2021) suggèrent que les données SWOT pourront également permettre l'estimation de la topographie intertidale ainsi que son évolution dans le temps.

Un des risques majeurs pour les populations vivant dans les zones littorales est dû aux submersions en cas de tempête ou cyclone, potentiellement conjuguées à des crues extrêmes dans les zones estuariennes et deltaïques. L'avènement de données satellitales plus précises près des côtes ainsi que le développement de modèles mieux résolus et améliorés notamment grâce aux bathymétries plus réalistes permet de simuler avec un réalisme accru les phénomènes d'inondations et de submersion (par exemple Khan et al., 2021). Les observations de vagues (SWH et spectres directionnels) sont critiques pour vérifier ou contraindre les modèles et les produits de CFOSAT sont analysés par les équipes de la Science Team actuelle et de la précédente dans les zones côtières, en particulier dans les lagons de Nouvelle Calédonie et de Polynésie (Oruba et al. 2022). Enfin, les mesures SMOS montrent que les forts cyclones se renforcent lors de leur passage au-dessus de zones dessalées, lié à la modification de la structure verticale de la couche de mélange entraînant une réduction du refroidissement des eaux de surface (Balaguru et al. 2020, Reul et al. 2021).

Un reprocessing adapté des formes d'onde côtières des mesures à haute résolution (300 m) des missions Jason-1, Jason-2, Jason-3 a permis de raffiner les mesures de hauteur de mer à la côte (Birol et al., 2021). Ces nouvelles données permettent d'estimer la hausse du niveau de la mer au plus près de la côte (de 15 km à la côte) depuis 2002. Ce nouveau produit est important pour l'étude des impacts de la hausse du niveau de la mer, car à la côte, la hausse de la mer peut différer de la hausse au large en raison de processus côtiers de petite échelle, tels que des courants côtiers, une tendance dans les vagues, l'apport d'eau douce dans les deltas des fleuves et les estuaires (e.g. Gouzenes et al., 2020 ; Marti et al., 2021). Ces phénomènes sont mal connus et pour l'instant difficilement quantifiables. Ce travail a mis en évidence dans 756 sites côtiers que la majorité des sites (environ 85%) montrent une hausse du niveau de la mer à la côte identique à celle qui est observée au large (à plus de 20km). En revanche pour 15% des sites côtiers la mer monte plus vite ou moins vite qu'au large (Cazenave et al., 2022).

Par ailleurs, un Groupe de Travail en Altimétrie Côtière toulousain (CNES, LEGOS, CLS et Noveltis) a été créé. Une comparaison de différents algorithmes de calcul de SLA sont en cours sur 3 zones tests avec l'objectif de définir le meilleur jeu de corrections pour les données de l'altimétrie nadir en mode low-resolution dans les zones côtières (Birol et al., OSTST 2022).

En préparation à la mission altimétrique SWOT et à la validation puis à l'exploitation des données sur le plateau et dans les zones littorales et estuariennes, de nombreuses études de modélisation ont été réalisées. Il est clair en effet que les simulations, avec ou sans assimilation, seront nécessaires en appui de l'interprétation de ces nouvelles données. Concernant la circulation sur le plateau, la dynamique des panaches des fleuves a été investiguée dans différents cas, par exemple celui de la Gironde (p.ex. Ayouche et al., 2021 ; Toublanc et al., 2023), de l'Amazone (Gevaudan et al., 2022) ou encore du Fleuve Rouge (Nguyen-Duy et al., 2021). Dans les estuaires, notamment de la Seine, Gironde, Amazone, les enjeux portent principalement sur la modélisation de la marée, des interactions marées-débit, des méthodes de de-tiding et d'estimation des débits (p.ex. Chevalier et al., 2019; Fassoni-Andrade et al., 2023).

L'étude des zones côtières sous influence notamment des eaux continentales devraient bénéficier dans le futur des données à haute résolution de la mission TRISHNA tandis que des travaux

préparatoires montrent le bénéfice que représenteraient des données de salinité à haute résolution, dans le cadre de la mission SMOS-HR (Alory et al., 2021).

1.3. TP3 : LES FINES ECHELLES SPATIO-TEMPORELLES

On parle de fines échelles océaniques pour des structures telles que tourbillons et filaments de méso- et subméso-échelle et ondes internes avec de tailles typiques de 1-100 km. Ce régime joue un rôle primordial dans le transport d'énergie et de matière ainsi que dans la modulation des processus biogéochimiques et écologiques. Pour ces études, la donnée spatiale reste la seule observation à la fois globale et à haute résolution.

La détection de structures de fine échelle par analyse multi-satellite (altimétrie et couleur de l'eau en particulier) demeure un outil essentiel dans les stratégies d'échantillonnage adaptatives in situ. L'utilisation de ces données permet de cibler en temps quasi-réel des structures océaniques spécifiques comme tourbillons et filaments pour des études de processus. Cela a été par exemple le cas de la campagne PROTEVSMED-SWOT, qui a visé un front typique de la Méditerranée occidentale et montré que cette structure a, sur la communauté phytoplanctonique, des effets structurants assez similaires aux effets observés dans le cas des fronts caractéristiques des courants de bord, pourtant beaucoup plus énergétiques et profonds (Tzortzis et al. 2022). Les mesures satellitaires de salinité ont également révélé de nombreuses structures fines (50-100km) méconnues jusqu'alors (Boutin et al. 2023). Ainsi, des cartes de salinité, chlorophylle, et température de surface dérivées par observation satellite, ainsi que la détection de tourbillons à partir de cartes altimétriques avec des algorithmes avancés (Laxenaire et al. 2018) ont joué un rôle essentiel dans la campagne EUREC4A-OA, et ont permis de coordonner le déploiement d'un grand nombre de plateformes d'observations, pour mieux quantifier la contribution des tourbillons de l'Atlantique tropical ouest sur la dynamique océanique et aux échanges avec l'atmosphère et de découvrir en particulier dans cette région, en hiver, un puits de carbone dix fois plus intense que ce qui avait été précédemment estimé (Olivier et al. 2022, Olivier et al., 2024) (Fig. 2).

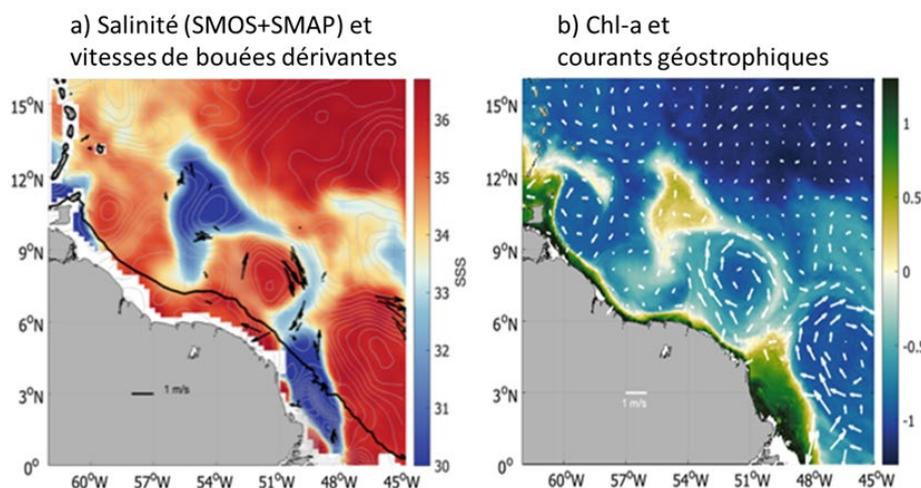


Fig. 2 : Salinité à la surface de la mer (SMOS+SMAP) et trajectoires de bouées dérivantes au large de la Guyane (gauche) et de Chlorophylle-a et courants géostrophiques altimétriques (droite) montrant l'évolution d'un patch d'eau douce enrichi en chlorophylle se détachant du panache de l'Amazonie (Olivier et al., 2024)

Une partie des travaux sur les fines échelles a été réalisé en préparation de la mission altimétrique à interférométrie radar SWOT, dont les cartes de hauteur dynamique à une résolution kilométrique et valables jusqu'à la côte, promettent une véritable révolution. Une analyse des pentes spectrales a montré la possibilité d'exploiter le signal altimétrique le long de la trace pour estimer une échelle spatiale critique qui sépare la dynamique géostrophique de la dynamique ondulatoire (Vergara et al. 2023). Cette échelle peut varier entre ~200km dans les tropiques jusqu'à quelques dizaines de km aux hautes latitudes. Ce résultat permet de valider le réalisme des modèles de circulation et d'interpréter en termes de dynamique le signal altimétrique, en particulier en préparation des cartes

haute résolution qui seront bientôt disponibles avec la mission SWOT. Afin de mieux comprendre la nature des signaux observés dans la gamme de la méso- et sous-mésoéchelle, de nombreuses études (Le Guillou et al., 2021; Tchilibou et al., 2022; Bendinger et al., 2023) ont porté sur la marée interne et ses interactions avec la circulation océanique. Les efforts ont permis de mettre au point des simulations réalistes à haute résolution forcées par la marée à l'échelle régionale, du bassin et globale. Tout d'abord, la prise en compte des marées internes améliore la représentation de la stratification, et impacte celle de la modification des masses d'eau et du climat régional (Tchilibou et al, 2020; Assene et al., 2023). Des méthodes basées sur les équations de la dynamique, statistiques ou sur l'IA ont été explorées pour séparer les signaux d'élévation de la surface dues à la marée interne de ceux liés à la circulation océanique géostrophique. Enfin, des campagnes en mer dédiées à l'observation de la marée interne (p.ex. AMAZOMIX, SWOT-ALIS) ont été organisées tandis que la prise en compte de la marée barotrope et interne dans les techniques d'assimilation fait l'objet de différents travaux, notamment à Mercator Ocean.

En 2023 plus de vingt campagnes océanographiques se sont coordonnées autour du monde dans le cadre de la CalVal SWOT (phase à 1 jour) pour viser des structures de fines échelles identifiées par des cartes multi-satellite sous la trace de SWOT (<https://www.swot-adac.org>) (Fig. 3). Si les résultats finaux demanderont plusieurs mois pour être analysés, cette ambitieuse initiative multi-site (fortement soutenue par le CNES) montre bien l'effet levier de cette nouvelle mission pour fédérer des programmes internationaux d'envergure.

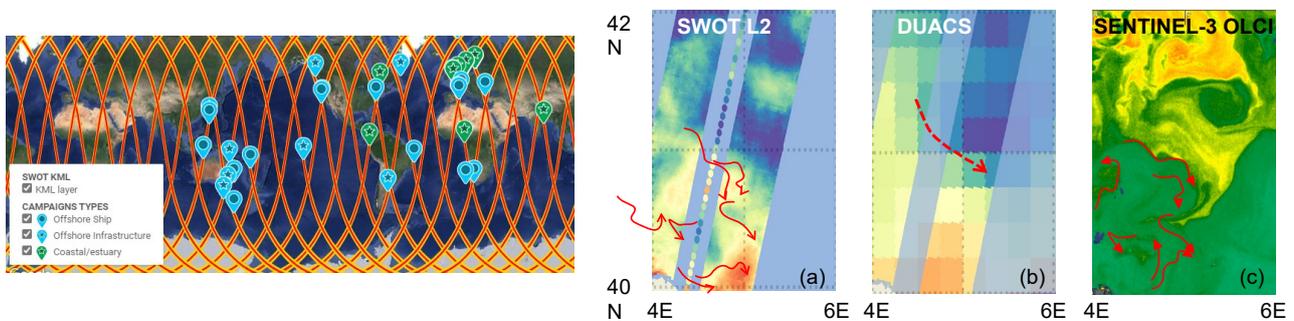


Fig. 3 : Campagnes Cal/Val de SWOT (AdAc Consortium - [swot-adac.org](https://www.swot-adac.org)) et exemple d'une analyse visuelle effectuée en temps quasi-réel le 20 avril 2023 pour la région d'étude de BIOSWOT-Med (Pis : A. Doglioli, G. Grégori). Même si le produit KaRIn (a) était basé sur un traitement préliminaire, ses patterns de circulation étaient déjà extrêmement plus clairs que dans les cartes DUACS (b), et en accord remarquable avec les structures de méso- et subméso-échelle visibles sur les cartes Sentinel-3 OLCI (c).

Les premières analyses des observations SWOT montrent, par ailleurs, le potentiel exceptionnel de cette mission pour l'étude des fines échelles océaniques (Fig. 4).

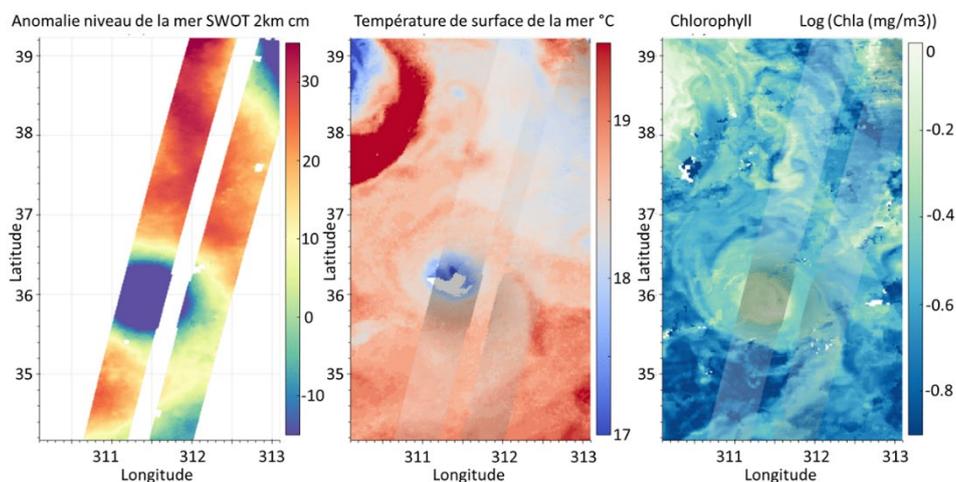


Fig. 4 : Premiers résultats SWOT mettant en évidence la qualité remarquable des observations pour le suivi des petites échelles océaniques

Des études originales ont été également menées sur les tourbillons confinés dans les grands lacs de l'Asie continentale, faisant plusieurs dizaines de kilomètres de diamètre et ayant des caractéristiques très similaires aux tourbillons de la mésoéchelle océanique. Elles ont servi de laboratoire naturel pour étudier l'hydrodynamique de fine échelle (Kouraev et al. 2021). Au-delà de la compréhension des processus de fine échelle, ces études sont conduites en collaboration avec les acteurs locaux et ont montré aussi leur importance sociétale. En effet, la présence de ces tourbillons peut fragiliser la couche de glace qui est utilisée comme voie de transport dans la saison hivernale et être à l'origine d'accidents.

1.4. TP4 : LA BIOGEOCHIMIE ET L'ÉCOLOGIE MARINE

La compréhension de la biogéochimie marine et de son couplage avec la physique, du global au côtier, fait partie des grands enjeux scientifiques de la prochaine décennie, notamment au niveau du cycle du carbone, de l'évolution de la production primaire, des échelons trophiques plus élevés et plus généralement de la biodiversité marine.

De longues (> 20 ans) séries continues d'observations satellitaires de Chlorophylle-a (Chla), seule variable observable représentative de l'état de l'écosystème marin et disponible à l'échelle globale, sont désormais accessibles au travers de produits fusionnés (CCI, Copernicus Marine / Globcolour). Ces séries ont récemment permis de déconvoluer la variabilité de la biomasse du phytoplancton sur des échelles spatiales ou temporelles inédites.

Un résultat majeur (Keerthi et al., 2022) est que, derrière la variabilité saisonnière (associée au bloom de phytoplancton) la variabilité de la chlorophylle de surface à l'échelle globale apparaît davantage dominée par des fluctuations à haute fréquence (<3 mois) et à de petites échelles spatiales (<50 km) que par des fluctuations basse-fréquence, ce qui était le paradigme dominant jusqu'alors. Il en ressort que les événements extrêmes haute fréquence doivent être considérés dans le contexte de la détection et de la compréhension de la réponse du phytoplancton au changement climatique.

L'analyse de 20 années de données de Chl-a et SST a mis en évidence des efflorescences de phytoplancton plus précoces (une à deux semaines) et plus fortes (deux à trois fois plus intense) dans les zones frontales dans la région du Gulf Stream (Haëck et al., 2023). Ces mécanismes pourraient entraîner des conséquences en cascade sur les écosystèmes océaniques, la biodiversité et la capacité à fixer du carbone.

Des analyses régionales en Méditerranée montrent que les variations intra-saisonnières de Chla peuvent être aussi importantes que les variations saisonnières et dépendent de l'activité méso-échelle ou des tempêtes (Keerthi, et al., 2020). Les rafales de vent quant à elle sont particulièrement importantes pour comprendre la dynamique du bloom phytoplanctonique (Keerthi, et al., 2021).

Le développement de capteurs in situ multi-variables (e.g. Chla et éclaircissement), notamment porté par les éléphants de mer, permet d'envisager une caractérisation de la toute petite échelle spatiale (sub-mesoéchelle) et temporelle (<jour) de la variabilité de la Chla dans l'Océan Austral (Le Ster et al., 2023). Ces nouveaux types de mesure devraient permettre d'apporter des éléments de compréhension sur l'importance des événements à petite échelle sur la biomasse Chla, tel qu'illustré désormais par les observations satellitaires.

A l'échelle globale, la synopticit  des observations « couleur de l'océan » associée à des approches de type « machine learning » permettent d'envisager la quantification de nouveaux produits biogéochimiques à l'échelle globale en tirant profit de base de données in situ, désormais de quantité et de qualité croissantes, associant mesures biogéochimiques à optiques.

Il en est ainsi d'une nouvelle méthode développée pour la quantification du DOC de surface, plus grand réservoir de carbone organique dans l'océan (Bonelli et al., 2022). Cette méthode repose sur un réseau neuronal artificiel (ANN) prenant en compte différents paramètres tels que la température de surface de la mer (SST), la couche de mélange (MLD), la concentration en Chla ou l'absorption par la matière organique dissoute colorée (CDOM), et cela à des pas de temps différents (Fig. 5).

Enfin on notera que le déploiement de flotteurs BGC-Argo équipés de capteurs bio-optiques permet de compléter très avantageusement les bases de données historiques de référence en support des activités de validation (e.g. Vadakke-Chanat et Jamet, 2023).

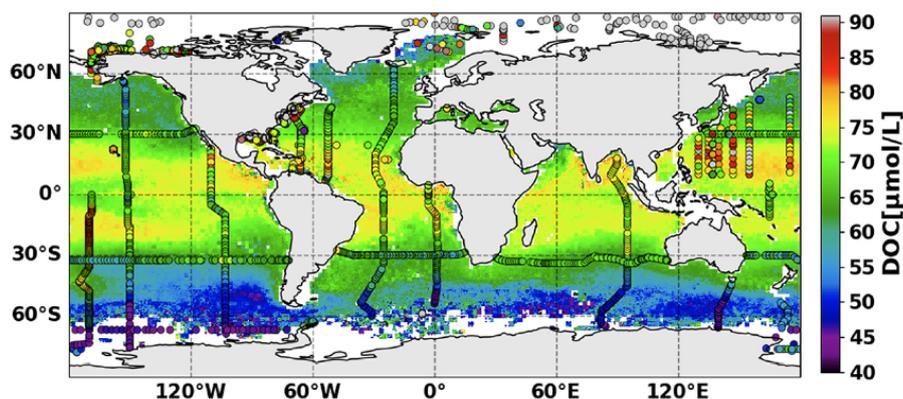


Fig. 5 : Distribution du Carbone Organique dissous à la surface de l’Océan (Bonelli et al., 2022). Les cercles représentent les observations in situ.

1.5. TP5 : LES ZONES POLAIRES

Les zones polaires subissent en raison du réchauffement climatique des changements majeurs bien plus rapides que l’océan global (phénomène d’amplification polaire). Ce sont des régions clés peu observées sources de nombreux enjeux géostratégiques, notamment dans l’Arctique. Alors que la disparition de la banquise arctique estivale semble maintenant inéluctable (Kim et al. 2023), la banquise antarctique connaît à son tour une déstabilisation soudaine avec de probables conséquences majeures sur la stabilité de la calotte et le niveau de la mer (Fig. 6).

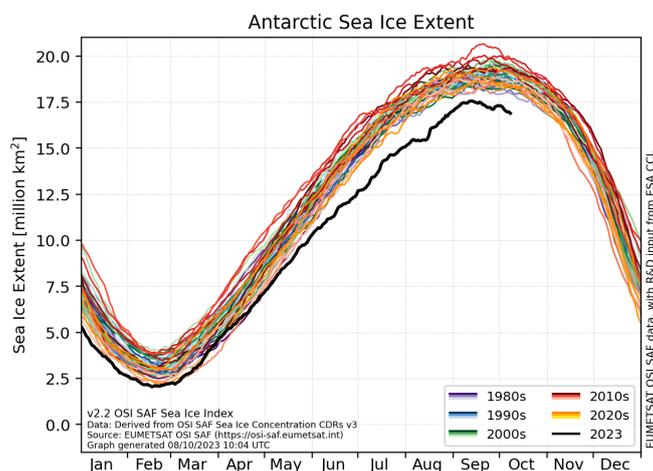


Fig. 6 : Anomalie d’extension de la banquise australe de 1981 à 2023 par rapport à la moyenne 1981-2010 (Eumetsat OSI SAF). La chute brutale observée depuis le printemps 2023 n’est pas encore expliquée et ses conséquences sur la stabilité de la calotte ne sont pas encore évaluées

Les principaux résultats obtenus par la communauté nationale concernent le suivi de l’épaisseur de la banquise et de la neige. Ce n’est qu’avec l’arrivée de l’altimétrie SAR avec CryoSat-2 (CS2) que des mesures fiables d’épaisseur de glace ont pu être réalisées, mais, malgré la longévité de CS2, cela représente une série trop courte pour établir et comprendre les évolutions climatiques. À partir de technique d’IA, le LEGOS a pu reconstituer une série homogène sur 30 ans des banquises Arctique et Antarctique (Fig. 7) en calibrant successivement Envisat, ERS-2 et ERS-1 sur CS2 (Bocquet et al. 2023). Le LEGOS a également étendu ses séries d’épaisseur de neige sur la

banquise par bi-fréquence altimétrique (CS2/Ku et Saral/Ka) à l'Antarctique (Garnier et al. 2021) et travaille actuellement à des techniques combinant CS2 et IceSat-2.

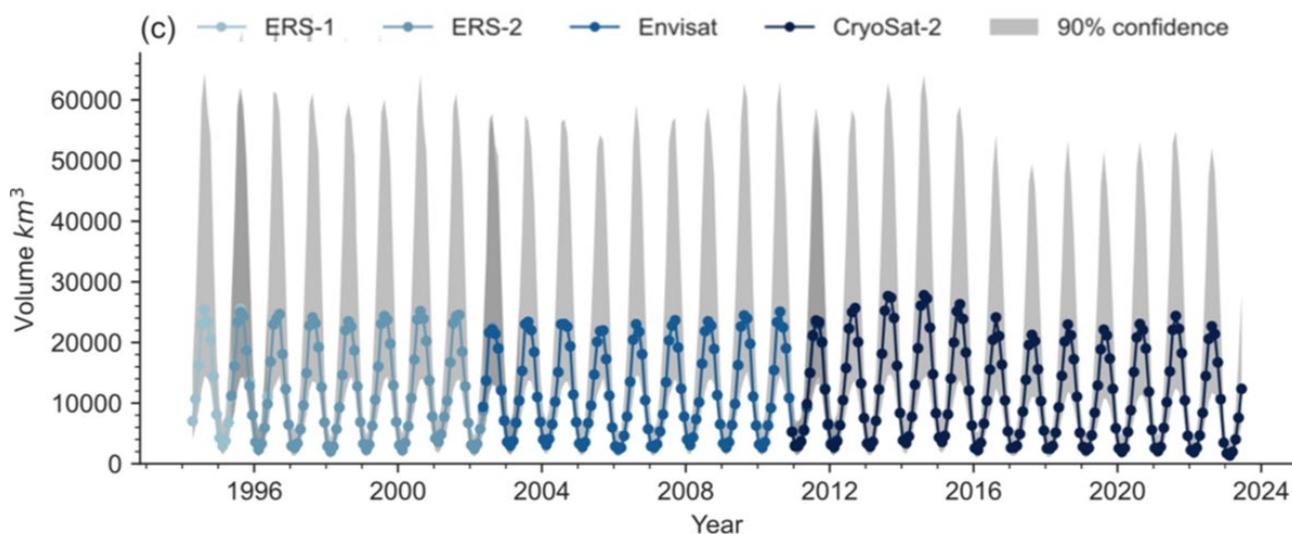


Fig. 7 : Première observation spatiale sur 30 ans des variations de volume de la banquise Australe (Bocquet et al. 2024).

Il est important de noter que le LEGOS est le seul laboratoire national qui observe la banquise par altimétrie (1 seul permanent). Seuls 3 laboratoires autres ont cette compétence en Europe: CPOM en Angleterre (3), AWI en Allemagne (2) et l'Université de Tromsø en Norvège (2). Au regard des évolutions dramatiques des banquises boréale et australe cela représente un déficit inquiétant alors que de nombreuses missions altimétriques sont encore sous exploitées (S3, HY, SWOT, CFOSAT) ou en préparation (CRISTAL, S3NG) et que le Polar Prediction Project YOPP a souligné dans ses conclusions l'urgence d'améliorer les prévisions synoptiques et sous-saisonniers de l'épaisseur de la glace de mer (Qinghua Yang et al., 2023).

La détection des icebergs dans l'Arctique et l'océan Austral est, par ailleurs, maintenant réalisée d'une manière systématique en utilisant les données altimétriques ainsi que par les données SAR de Sentinel 1A et 1B (Tournadre et al., 2021).

Des changements importants sur la salinité (et par conséquent sur la densité) sont attendus du fait de la fonte de la glace et des changements de circulation océaniques induits par les variations de densité. La série temporelle des salinités de surface satellitaire est encore trop courte (13 ans) pour observer des tendances climatiques sur le long terme, mais elle a permis d'observer de très forts contrastes interannuels (Grodski et al. 2021, Supply et al. 2021), et d'analyser l'évolution spatio-temporelle de cellules d'eau douce en surface provenant de la fonte de la glace ou de panaches de fleuve en relation avec les courants de surface et les vents (Tarasenko et al. 2021, Supply et al. 2022). Ces études illustrent le fort besoin de continuité de la mesure de salinité dans les zones polaires (CIMR), et les bénéfiques à tirer de mesures qui seraient plus précises (CRYORAD) et mieux résolues spatialement (SMOS-HR).

L'observation de la couleur de l'océan a permis de mieux cerner l'évolution des flux biogéochimiques aux différentes frontières de l'océan Arctique, c'est-à-dire le long du continuum continent-océan, à l'interface océan-atmosphère dans les deux sens, et au niveau de l'Atlantique Nord. L'augmentation du débit des grands fleuves arctiques et la fonte du permafrost ont ensemble conduit à une augmentation du flux de carbone organique particulaire et dissous terrestre vers l'océan Arctique (Matsuoka et al. 2022). Ardyna et al. (2022) ont mis en évidence l'impact d'apports de nutriments par voie atmosphérique, issus de grands feux de forêt, sur la production primaire marine de l'océan Arctique. Vu la carence chronique de l'océan Arctique en azote, l'accroissement des surfaces océaniques sans glace en été, et l'augmentation de la fréquence des grands feux de forêt dans l'hémisphère nord, ce phénomène d'ensemencement par l'atmosphère constitue une nouvelle source de production primaire potentiellement significative. Par ailleurs, Galì et al. (2019) ont

observé que la production primaire marine en cours d'augmentation en Arctique (Ardyna et Arrigo 2020) conduit en retour à un accroissement du flux de DMS phytoplanctonique vers l'atmosphère, avec de possibles répercussions sur la nébulosité. Ce phénomène pourrait constituer une boucle de rétroaction négative. Finalement, en combinant données de couleur de l'océan et d'altimétrie, Oziel et al. (2020) ont mis en évidence une présence de plus en plus importante de la microalgue *emiliana huxleyi* en mer de Barents à cause d'une advection plus intense de masses d'eau provenant de l'Atlantique Nord, ce qui confirmerait l'atlantification de ce secteur de l'océan Arctique.

Des travaux ont aussi été réalisés en vue de maximiser l'exploitation des données de couleur de l'océan en Arctique, et plus largement des capteurs satellitaires optiques. Ainsi, Lacour et al. (2020) ont évalué l'utilisation des données du lidar CALIOP en vue d'étudier la production primaire en Arctique quand l'élévation solaire proscrit l'observation de la couleur de l'océan. Les résultats en demi-teinte mettent en évidence le potentiel du lidar spatial en milieu polaire, mais aussi la nécessité de développer un nouveau capteur dédié, optimisé pour l'océan et le phytoplancton. Laliberté et al. (2022) ont mis au point une méthode d'estimation de l'albédo de la glace de mer dans le visible à l'aide des données de capteurs optiques tels que MODIS et OLCI. Cette approche doit permettre d'estimer l'éclairement sous une banquise de plus en plus mince, en vue d'évaluer la production primaire invisible aux satellites. Finalement, Oziel et al. (2022) ont mis au point une nouvelle archive pour l'océan Arctique qui combine les données historiques du capteur CZCS et celles des capteurs SeaWiFS et MODIS, qui permettra de mettre en perspectives sur près de 40 ans l'augmentation actuelle de la production primaire en Arctique.

1.6. TT1 : L'Océanographie opérationnelle

L'océanographie opérationnelle apporte une approche intégrée pour répondre au besoin de plus en plus affirmé de suivi et de prévision des océans. Les systèmes de réanalyse, d'analyse et de prévision océanique permettent aujourd'hui de représenter et de prévoir l'évolution de l'océan aux échelles globale, régionale et côtière pour une large diversité de variables, de processus à des échelles spatiales et temporelles très variées. Cette thématique s'est fortement structurée ces dernières années en Europe dans le cadre du service marin de Copernicus avec une forte contribution d'acteurs Français et avec un lien fort avec l'océanographie spatiale et les projets soutenus par le TOSCA. Les observations spatiales jouent un rôle essentiel et la continuité des missions, les nouvelles missions et les retraitements réalisés dans les années passées ont permis d'améliorer la précision, la couverture spatiale et temporelle et de fournir des informations sur la qualité et la fiabilité de ces variables, informations essentielles au suivi et à la prévision de l'océan. Les améliorations apportées aux systèmes d'océanographie opérationnelle (e.g. résolution des modèles, nouvelles méthodes d'assimilation de données, couplages) ont permis une meilleure prise en compte des observations. Des efforts importants ont été menés pour mieux quantifier le rôle des observations pour la prévision océanique.

Les missions spatiales permettent l'observation du niveau de la mer, de la température de surface, de la salinité de surface ainsi que des mesures de hauteur significative des vagues, de spectres de vagues et la concentration, l'épaisseur et les vitesses de déplacement de la glace de mer. Les systèmes d'analyse et de prévision mis en place et opérés aujourd'hui permettent d'assimiler ces données spatiales aux échelles globales, régionales et côtières allant d'une dizaine de kilomètres de résolution jusqu'à des échelles sub kilométriques. De nombreux projets ont contribué au développement des méthodes de reconstructions et de modélisation pour prendre en compte les couplages, océan, vagues (Aouf et al., 2021), atmosphère (Renault et al., 2023 ; Nguyen-Duy et al. 2023), la modélisation de la marée (Lyard et al, 2021), ainsi que la représentation de fines échelles (meso and sub mésoéchelles) océaniques (D'Ovidio et al., 2019). Les activités de R&D amont menés par le CNES et CLS pour améliorer la qualité et la cohérence dans le temps des nombreuses missions altimétriques a permis d'améliorer la prise en compte et l'impact de ces données pour la prévision océanique (Mercator Océan, Meteo France) (e.g. Mulet et al., 2021 ; Dibarboure et al., 2022; Pujol et al., 2023). La prise en compte de la salinité observée par SMOS est aujourd'hui effective dans certains produits opérationnels et la reconstruction et l'assimilation de la glace de mer est essentielle dans les systèmes d'analyse et de prévision globaux. La valorisation des missions pour l'océanographie opérationnelle fait partie intégrante des activités des science teams des

différentes missions (e.g. OSTST, SMOS, CFOSAT) (Gasparin et al 2023 ; Aouf et al 2022 ; Martin et al, 2020). On peut noter, en particulier, les travaux menés autour de l'assimilation des données spectres de vagues de la mission CFOSAT (Aouf, 2022) qui sont maintenant intégrés dans la prévision opérationnelle des vagues (Météo France, Copernicus Marine Service) (Fig. 8).

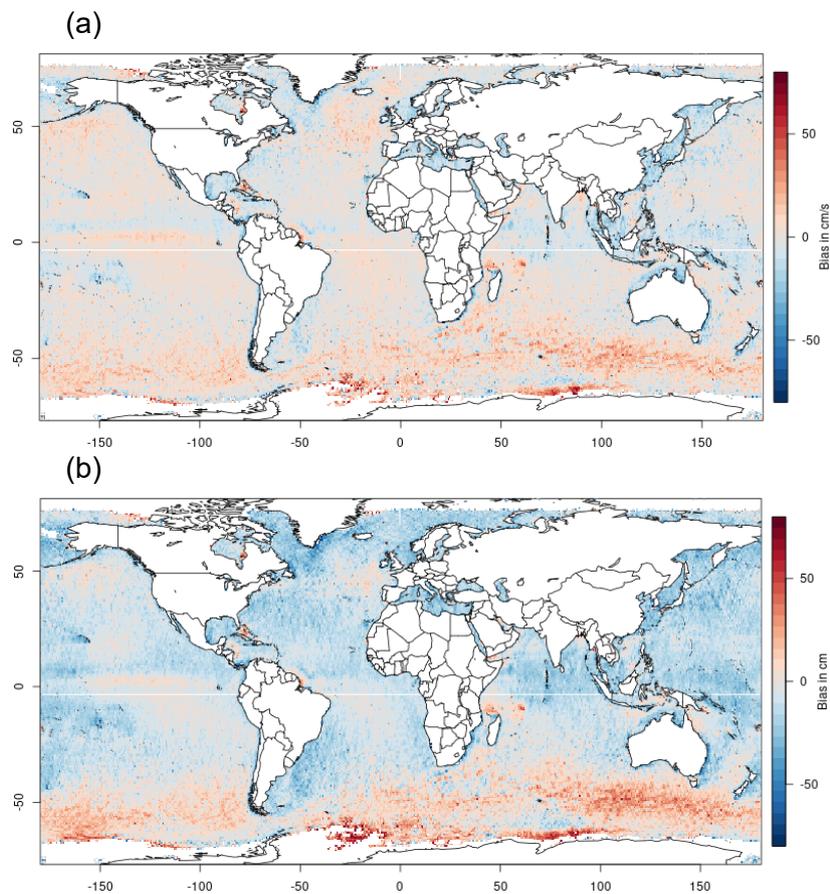


Fig. 8 : Impact de l'assimilation des spectres de vagues pour la prévision opérationnelle des états de mers (Aouf et al., 2022). Cartes de biais de hauteurs significatives des vagues en comparaison avec des données altimétriques indépendantes pendant la période de Juillet à Décembre 2019. (a) et (b) représentent respectivement des simulations du modèle MFWAM avec et sans assimilation des spectres directionnels de vagues de CFOSAT. Réduction des biais sur la hauteur significative des vagues.

La communauté TOSCA a également fortement contribué à la préparation de nouvelles missions autour de protocoles expérimentaux permettant de quantifier l'apports de futures données comme les Observing System Simulation Experiment (OSSE) avec en priorité la mission SWOT (Benkiran et al, 2021 ; Tchonang et al., 2021) et la préparation des futures missions à large fauchée (S3 NG TOPO) ainsi que pour l'observation des courants de surface (ODYSEA) ou de la glace de mer (CIMR, CRISTAL).

L'observation satellite de la couleur de l'eau est essentielle à la reconstruction de variables biogéochimiques marines et cela par la combinaison avec les observations in situ et l'assimilation dans des modèles numériques pour générer des variables dérivées. Les récentes missions Sentinel-3 (et Sentinel-2 pour le côtier) permettent une utilisation opérationnelle de ces données et la production de certains paramètres essentiels comme la chlorophylle de surface, la pression partielle de surface de CO₂, le pH ainsi que d'autres variables déduites par modélisation et combinaison avec les observations in situ comme les principaux nutriments nitrate, phosphate, silicate ou l'oxygène et le fer.

L'observation de la biologie marine est moins directe via les observations spatiales mais la contribution du spatial est néanmoins essentielle pour le suivi de certaines quantités qui sont aujourd'hui produites comme la production primaire, le phytoplancton, le zooplancton ou le micronecton, les variables physiques et biogéochimiques étant les principaux forçages pour la

biologie marine (Haeck et al, 2023). Un lien indirect mais important et ayant contribué à l'océanographie opérationnelle est l'instrumentation d'espèces marines, projets soutenus par le TOSCA, permettant de compléter les observations in situ dans des régions spécifiques (McMahon et al, 2021) et d'en déduire des informations sur les comportements d'animaux marins (phoques, éléphants de mer, tortues marines ...).

1.7. TT2 : L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Les méthodes d'intelligence artificielle basées sur des réseaux de neurones et l'apprentissage profond ont été mises en place à travers plusieurs projets principalement pour des variables à la surface de l'océan, telles que la topographie de surface, la couleur de l'océan, la turbidité et les courants et des différentes missions spatiales (SWOT, CFOSAT, CIMR, Sentinel).

Ces méthodes fournissent de nouvelles solutions génériques et démontrent ou suggèrent des gains de performance significatifs (notamment en termes d'échelles résolues et processus pris en compte) pour une grande variété de problèmes de traitement des données satellitaires telles que l'interpolation spatio-temporelle pour des produits L4 (e.g., Vient et al. 2022, Archambault et al. 2022, Beauchamp et al., 2023), le downscaling de champs géophysiques (e.g., Thiria et al., 2023), le débruitage de données satellitaires (e.g., Febvre et al. 2022, Treboutte et al., 2023), la fusion de données multi-source (e.g., Alboody et al., 2021, Fablet et al., 2023), la segmentation et classification de structures géophysiques (e.g., Colin et al., 2022). On peut notamment souligner ici le nombre croissant d'études concernant des applications sur des jeux de données réelles (e.g., Vient et al. 2022, Archambault et al. 2022, Febvre et al. 2023).

Ces différents développements méthodologiques suggèrent également de nouvelles manières d'exploiter les différentes sources de données d'observation et simulation des océans. Pour les variables directement observées, les stratégies d'apprentissage exploitent directement les jeux de données satellitaires réelles, y compris lorsque ces données comportent des données manquantes. Dans ce contexte, l'apport de jeux de données associés à différents capteurs satellitaires est particulièrement pertinent pour des transferts d'apprentissage d'un capteur vers un autre (e.g., Cissé et al., 2022). Pour des variables non-directement observées ou très mal échantillonnées (e.g., courants de surface, altimétrie nadir, dynamiques de subsurface), l'exploitation de jeux de données de simulation OSSE (Observing System Simulation Experiment) lors des phases d'apprentissage semble une voie très prometteuse avec des performances de généralisation sur des données réelles très prometteuses (Febvre et al., 2023).

Le développement de ces méthodes IA s'accompagne d'un effort important pour définir des cadres d'inter-comparaison bien posés pour permettre une évaluation comparative des performances des approches proposées vis-à-vis d'un état de l'art. Les "data challenges" dédiés à l'altimétrie spatiale (e.g., Johnson et al., 2023, Data Challenge BOOST-SWOT) en sont une illustration pertinente qui joue un rôle significatif en termes d'animation de la communauté nationale et internationale.

Les méthodes d'apprentissage profond ont aussi été utilisées afin de fusionner des images satellites ayant des bandes spectrales et des résolutions spatiales différentes. C'est un enjeu important pour l'étude des zones côtières à partir de données satellite de la couleur de l'océan. Plusieurs travaux ont été réalisés en utilisant les données de Sentinel-2 et Sentinel-3 afin d'étudier la couleur de l'océan à haute résolution spatiale et multispectrale. Sept méthodes de fusion ont été comparées, basées sur des approches classiques, ou sur des factorisations matricielles/tensorielles ou de l'apprentissage profond. Globalement, les performances obtenues avec une approche d'apprentissage profond et une approche de factorisation matricielle sont meilleures qu'avec les autres approches testées (Alboody et al., 2021). Ces méthodes d'apprentissage profond ont aussi été utilisées pour la complétion des séries temporelles d'images Sentinel-2. Une approche de deep learning a été proposée pour compléter la série temporelle Sentinel-2, pour générer une nouvelle série d'images acquises aux mêmes moments que les données Sentinel-3 (Cissé et al., 2022).

2. RETOURS SUR LES PRIORITES 2019 VIS-A-VIS DES MISSIONS SPATIALES

La mise en place des missions **CIMR** (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) et **CRISTAL** (Copernicus polaR Ice and Snow Topography Altimeter) proposées dans le cadre du programme Sentinel Expansion du programme Copernicus étaient **des priorités fortes (P0) du TOSCA** afin d'assurer une continuité (avec des améliorations) des mesures micro-ondes de température de surface de la mer, de salinité (CIMR) et des mesures d'épaisseur de glace de mer (CRISTAL et CIMR) et répondre aux enjeux majeurs de l'observation en Arctique. Ces missions sont maintenant décidées et la communauté française est bien impliquée dans leur mise en place via la participation aux MAGs et à des activités préparatoires soutenues par l'ESA et le CNES :

- L'objectif de CIMR est de fournir des mesures radiométriques par imagerie micro-ondes et des produits dérivés avec une couverture globale et une revisite plus que quotidienne dans les régions polaires et les mers adjacentes pour répondre aux besoins des utilisateurs. CIMR permettra d'améliorer la continuité des missions de surveillance des paramètres de la glace de mer (concentration de la glace de mer SIC, dérive de la glace de mer SID, épaisseur de la glace de mer SIT), notamment en termes de résolution spatiale (jusqu'à ~5 km), de résolution temporelle (<1 jour) et de précision. Des mesures supplémentaires sur mer (température de surface de la mer SST, salinité SSS, vitesse du vent) et sur terre (température de surface de la terre, humidité du sol, biomasse) seront dérivées, avec une couverture globale, à des résolutions spatiales allant de ~15 km (SST) à 60 km (SSS). La solution technique de l'instrument CIMR est basée sur un radiomètre imageur à micro-ondes à balayage conique multicanal. Le radiomètre est optimisé avec des canaux à faible bruit centrés sur les bandes de fréquence L (résolution spatiale <60 km), C (≤15 km), X (≤15 km), Ka (≤5 km) et Ku (<5 km, objectif=4 km). Les données en bande L sont principalement utilisées pour surveiller les SSS, les vents et les SIT, les données en bande C/X pour les SST et les données en bande Ka/Ku pour les SIC et les SID. Dans la pratique, de nombreux produits utilisent une combinaison de tous les canaux. Un balayage conique permet d'obtenir une très grande fauchée de près de 2000 km, ce qui permet une couverture subquotidienne de la région arctique et une couverture de 95 % de la Terre chaque jour à l'aide d'un seul satellite. Pour obtenir une haute résolution spatiale, un grand réflecteur déployable à mailles d'environ 8 m de diamètre est mis en œuvre. De multiples récepteurs à double fréquence et à polarisation linéaire (50 récepteurs) sont mis en œuvre pour minimiser le taux de rotation du réflecteur et des dispositifs d'étalonnage à charge froide actifs à bord maintiennent une faible incertitude standard totale de toutes les mesures. CIMR est en phase C/D à l'ESA/Copernicus, et est prévu sur Sentinel-Expansion-S11. Il est développé par un consortium dirigé par Thales Alenia Space Italia, et a passé avec succès la revue de conception préliminaire à l'automne 2022. La première mission CIMR devrait être lancée à l'horizon 2028+. Sur le plan scientifique, trois études sont actuellement menées en parallèle (d'une durée d'environ 2 ans), consacrées respectivement au développement du simulateur scientifique de bout en bout du CIMR (direction française), au développement des algorithmes L2 et à l'évaluation de la modélisation de l'incertitude du CIMR.
- CRISTAL. La mission CRISTAL ou Sentinel-9, emportera, pour la première fois dans le cadre d'une mission polaire, un altimètre radar à double fréquence (SAR Ka et SAR Ku) et un radiomètre à micro-ondes. Son objectif premier est de mesurer et surveiller l'évolution de l'épaisseur de la glace de mer, l'épaisseur de sa couverture neigeuse et l'élévation des calottes glaciaires dans la continuité de CryoSat-2. Ces données permettront de soutenir les opérations maritimes dans les océans polaires et contribueront à un meilleur suivi des processus climatiques, particulièrement dynamiques et alarmants dans les régions polaires. CRISTAL soutiendra également les applications liées aux eaux côtières et intérieures, et fournira des observations de la topographie des océans jusqu'à 88° de latitude, y compris sur les océans englacés. Son lancement est prévu pour fin 2027. Malgré un développement parfaitement dans les temps cette échéance est encore incertaine car le budget et les modalités de lancement ne sont pas encore définis ce qui soulève quelques inquiétudes concernant la continuité des mesures et la calibration avec CryoSat-2 lancé en 2010. D'un point de vue R&D, des travaux sur les retrackers sont encore nécessaires pour mieux

comprendre les effets de rugosité de la banquise sur la mesure (l'équivalent du Sea State Bias sur l'océan ouvert) et les conditions de pénétration de la fréquence Ku dans la neige.

Le développement de l'altimétrie à fauchée avec SWOT est une révolution en océanographie et océanographie opérationnelle et le TOSCA avait recommandé une démarche pro-active **pour inclure l'altimétrie à fauchée WISA (P0)** dans le scénario à long terme de Copernicus (mission topographie de Sentinel 3NG). L'objectif est la continuité et expansion des observations de topographie : le suivi de la mésoéchelle et submésoéchelle océanique, les échanges d'eau dans le continuum côtier, et le suivi d'eau dans les lacs, réservoirs, zones humides et rivières, et l'intégration de ces données dans les futurs systèmes d'analyse et de prévision océanique à haute résolution. La communauté française TOSCA s'est fortement engagée dans le MAG S3NG et le CNES dans les discussions avec la Commission Européenne et l'ESA afin de promouvoir ce choix. On ne peut que se réjouir des décisions récentes de choisir en priorité un scénario d'une constellation d'altimètre à fauchée pour Sentinel 3NG (post 2032).

Le groupe avait soutenu avec une très forte priorité une **mission courant de surface (P0)** autant pour la compréhension de la dynamique océanique de surface et des couplages océan/vagues/atmosphère, l'analyse des courants équatoriaux et l'observation de l'évolution rapide des zones marginales de glace, que pour sa contribution potentielle à l'océanographie opérationnelle et aux applications. Plusieurs concepts ont été proposés pour réaliser une mesure de vecteur courant de surface à partir du signal Doppler, en s'appuyant sur les démonstrations déjà réalisées pour la mesure d'une composante. Deux techniques principales sont possibles : la diffusiométrie Doppler qui permet de grandes fauchées (> 150 km) à un coût raisonnable, mais au prix d'un bruit de mesure important (de l'ordre de 10 cm/s pour une résolution de 25 km), l'interférométrie alongtrack SAR, qui permet une mesure beaucoup plus précise (autour de 10 cm/s pour une résolution de 1 km). Le concept SKIM est basé sur la diffusiométrie Doppler avec une mesure proche nadir (angles d'incidence de 12° et moins) ce qui permet une bonne précision sur le Doppler géophysique et une fauchée de 300 km de large. La haute résolution en range permet par ailleurs une mesure des vagues de longueurs d'onde de 30 m et plus, ce qui est indispensable pour compenser la contribution des vagues au Doppler géophysique, très importante à ces incidences. SKIM (observation courant/vagues) a fait l'objet d'une phase 0 CNES et d'une phase A ESA dans le cadre de l'appel Earth Explorer 9 (SKIM finaliste EE9 n'a pas été finalement retenue au profit de la mission FORUM). A plus grande incidence, on peut gagner en revisite, mais on perd la capacité de mesure du spectre des vagues (le temps d'intégration n'est plus compatible avec la nécessité de réduire le bruit de speckle). Comme la contribution des vagues au Doppler géophysique est réduite d'un facteur 4 entre 12° et 55°, cela n'est probablement pas critique. Une nouvelle proposition STREAM (observation courant/vent) a été faite à l'ESA pour Earth Explorer 11, avec une évaluation scientifique très favorable mais une estimation budgétaire hors limite. ODYSEA (observation courant/vent) reprend une bonne partie du concept radar de STREAM avec une fauchée de 1500 km de large, une incidence de 55° et l'utilisation de la bande Ka. La proposition ODYSEA a été soumise à l'appel Explorer de la NASA début aout 2023 avec une sélection de 4 missions pour une phase A compétitive de 9 mois en avril 2024, puis sélection de deux missions finalistes courant été 2025 (lancements 2030-2032). ODYSEA fait l'objet d'une lettre d'engagement du CNES : engagement ferme pour la phase A et avec réserves pour les phases BCDE1 d'implémentation (toute mission étant soumise au process de décision interne CNES).

La communauté océan/biogéochimie a mis en **priorité forte P0 (voir prospectives précédentes / mission GEO-OCAPI) le développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan** couvrant au moins l'Europe malgré l'absence d'un cadre programmatique pour cette mission. Le besoin de la communauté scientifique reste toujours d'actualité et ce besoin est aussi prioritaire pour le service marin de Copernicus (P0). Elle permettrait des avancées majeures pour l'observation et la compréhension des phénomènes à évolution rapide liés, en particulier, à la dynamique côtière et aux panaches des fleuves ainsi que l'étude du fonctionnement à petite échelle temporelle de l'écosystème et du cycle diurne de la photosynthèse/respiration. L'amélioration de la couverture spatio-temporelle par rapport aux satellites défilants (couverture nuageuse) sera très importante et permettra de bien mieux contraindre les modèles biogéochimiques via l'assimilation de données. Depuis le SPS 2019, il n'y pas eu d'opportunité de programmation mission de ce type et l'équipe

scientifique française OCAPI s'est dissoute. Le cadre programmatique d'une telle mission devrait être discuté avec Eumetsat. A noter les décisions de la NASA pour une mission couleur de l'eau en géostationnaire GLIMR (lancement 2026/2027) et des études de phase A menées par la NOAA pour ses futurs satellites géostationnaires GeoXO (post 2030 à la fin de la série GEOS-R) incluant un instrument couleur de l'océan hyperspectral.

Des priorités P1 avaient été mises sur SMOS-HR, TRISHNA, MARVEL en raison d'une contribution potentielle forte aux attentes de la communauté scientifique nationale en océanographie :

- **SMOS-HR.** La mission SMOS-HR vise à mesurer la salinité à la surface de la mer et l'épaisseur des glaces fines (<50cm) avec une résolution spatiale 2 à 3 fois meilleure que les mesures satellitaires existantes, un bruit radiométrique et des temps de revisite similaires à SMOS, ce qui satisfait les objectifs GCOS pour la SSS (goal (threshold): résolution : 10km (50km), incertitude 0.1pss (0.2pss) sur des moyennes mensuelles à 50-km de résolution). SMOS-HR a fait l'objet d'une étude de phase 0 au CNES finalisée en 2019, et d'une étude de Phase A étendue (CNES, CESBIO, ADS) entre 2020 et 2023. Dans un premier temps, à la demande du CNES, les études en phase A se sont focalisées sur l'étude d'un concept de 3eme génération avec un porteur principal type SMOS-HR et plusieurs dizaines de nanosatellites de type ULID (Unconnected L-Band Interferometry Demonstrator, alors en Phase A, (Anterrieu et al., 2021; Cabot et al., 2021) qui orbitent autour de ce porteur pour obtenir des résolutions spatiales de l'ordre du kilomètre. L'interférométrie utilisant des antennes non-connectées n'a néanmoins jamais été testée dans l'espace, et bien qu'ayant été classée prioritaire dans le cadre du dernier SPS du CNES, la mission démonstrateur ULID a fait l'objet d'un arrêt brutal. En conséquence, les études de la Phase A se sont recentrées sur un concept de 2^{ème} génération SMOS-HR en avril 2021. Plusieurs aspects de la mission ont été étudiés : besoin scientifique, configurations du réseau d'antennes pour répondre au besoin scientifique, faisabilité de la solution technique en termes de déploiement d'une grande structure, corrélateur et filtrage de sources d'interférence (RFIs), diagrammes des antennes élémentaires et méthodes de reconstruction d'image. Un séminaire de restitution a été organisé fin 2022 (~50 participants internationaux). Une réponse à l'appel d'offre Earth Explorer 12 de l'ESA a été soumise en septembre 2023, avec un concept technique inspiré des études SMOS-HR et ULID. En concertation avec l'ESA, il a été décidé de focaliser l'objectif principal de la mission (rebaptisée FRESCH, Fine-resolution Explorer for Salinity, Carbon and Hydrology) autour de la SSS qui n'est actuellement pas observable depuis l'espace par d'autres techniques que la radiométrie en bande L. Sa mesure à ~10 km de résolution permettra de mieux contraindre les bilans du cycle hydrologique, du cycle énergétique et des cycles biogéochimiques (notamment le cycle du carbone), en particulier à l'approche terre-mer. L'équipe proposante est constituée de 12 membres dont 6 océanographes.
- **MARVEL.** La mission MARVEL était une mission de gravimétrie spatiale multithématique qui avait pour objectif de répondre à des questions scientifiques majeures sur le climat, la cryosphère, l'océanographie, l'hydrologie, la géodésie et la géophysique. Parmi ces questions, la question du système de référence est particulièrement importante car elle sous-tend toutes les autres questions en ce sens qu'un système de référence suffisamment précis est nécessaire pour évaluer précisément la variabilité du champ de gravité. Pour le présent immédiat, la précision du système de référence n'est pas le facteur limitant. Etant donné cet état de fait, les partenaires américains de la NASA/JPL ont décidé dans le decadal survey de proposer une mission "Mass Change" qui ne s'intéresse qu'au champ de gravité variable. L'idée de MARVEL originale est différente de Mass change. L'idée était de faire un lien inter satellite radial entre un satellite bas et un satellite haut pour estimer le champ de gravité variable et d'équiper le satellite haut des instruments précis de colocalisation afin de réaliser le système de référence à 0.1mm en même temps que la mesure du champ variable. MARVEL ne pouvant se faire qu'en coopération avec le JPL, il a fallu trouver une configuration MARVEL qui remplisse les objectifs scientifiques Mass change et MARVEL à la fois. Malheureusement les performances de restitution du champ de gravité par lien inter satellite radial se sont avérées très décevantes. Le cas radial a donc dû être abandonné en mai 2020. Les seules solutions restantes étaient des solutions "in plane" donc sans satellite

haut et sans réalisation du système de référence. Le groupe science et le groupe mission Marvel s'est reconfiguré fin 2020 pour proposer une configuration "in plane" compétitive au JPL et à l'ESA afin de participer à la prochaine mission de gravimétrie du champ variable NASA/ESA qui s'appelle MAGIC (Mass-Change and Geosciences International Constellation). La mission se composera de quatre satellites, fonctionnant par paires, et mesurera les fluctuations du champ gravitationnel de la Terre. La paire de satellites en cours de développement à la NASA (P1) s'appelle GRACE-C et s'appuiera fortement sur l'héritage des satellites GRACE-FO, tandis que la paire en cours de développement à l'ESA (P2) s'appelle Next Generation Gravity Mission (NGGM). Aujourd'hui le CNES est partie prenante de cette mission MAGIC-NGGM qui sera lancé à la fin de la décennie. NGGM a achevé une phase A et entame une phase B1. Par ailleurs les questions du système de référence ont été reprises dans le projet GENESIS porté par l'ESA auquel le CNES participe aussi.

- TRISHNA. Vis-à-vis des problématiques et enjeux côtiers, la mesure de la température de surface de la mer (SST) à très haute résolution (50 m et revisite de 3 jours) que va permettre TRISHNA revêt un intérêt certain pour la communauté océan. Une composante océan de TRISHNA s'est ainsi progressivement structurée dans le cadre du TOSCA afin de travailler sur la définition et l'optimisation des algorithmes de SST côtières de niveau 2 et 3 et des jeux de données de référence pour la cal/val. Des axes scientifiques prioritaires ont été définis : milieu côtier et lagunaire en Méditerranée, les décharges d'eaux souterraines, et modélisation à haute résolution dans le golfe du Lion. Ces actions devront se consolider et il sera nécessaire de dynamiser la communauté nationale et internationale des utilisateurs côtiers sur cette thématique SST côtière. Cela est d'autant plus important que TRISHNA sera un précurseur de la mission LSTM (Land Surface Temperature Mission) de Copernicus (lancement prévu en 2028).

Dans le cadre budgétaire CNES de plus en plus contraint et au vu du nombre croissant de satellites en phase d'exploitation pour lesquels le CNES est plus ou moins impliqué et suite à une recommandation du SPS 2019, chaque extension mission fait l'objet depuis 2020 d'un process REDEM (Revue d'Extension DE Mission) CNES renforcé. Ce process impose entre autres au PI mission de soumettre au TOSCA un dossier scientifique répondant à un canevas imposé (bilan scientifique dont résultats emblématiques, projet scientifique pour l'extension (continuité mesure en attente future mission (ex : CFOSAT toujours seul satellite permettant d'avoir un spectre de vague et sans mission internationale prenant officiellement le relais), activités scientifiques et applicatives, demandes éventuelles d'évolution mission (changement orbite, mode acquisition...)).

L'exercice imposé est d'autant plus exigeant et « challengé » pour toute mission dite contributrice au Service Marin Copernicus (SARAL, CFOSAT, SWOT) financée par le CNES au service de l'Europe. Sur la période 2019-2023 les missions SARAL, CFOSAT, SMOS et Jason-3 ont faits l'objet de REDEM qui ont toutes menées à des décisions d'extensions de mission, fortement soutenues par le TOSCA. A noter qu'en 2023 on a une constellation (certes non optimisée) de 12 altimètres en vol: 11 altimètres Nadir (incluant l'altimètre Nadir de SWOT) et un altimètre à large fauchée.

3. ALGORITHMIE, EXPLOITATION DES DONNEES ET POLES DE DONNEES

Soutien des équipes algorithmiques et support aux Science Team internationales

- La communauté s'est organisée autour de groupes mission fortement soutenus par le TOSCA (SMOS, OCAPI, SARAL, CFOSAT, SWOT, OSTST) qui sont fondamentaux pour coordonner les activités au niveau national, avec une ouverture forte de ces groupes à l'international, ce qui a permis de renforcer le rayonnement de la communauté française. Le CNES s'appuyant sur son comité TOSCA/océan sélectionne les projets nationaux et internationaux (hors projets du pays de son partenaire NASA ou CSNA) pour intégrer les Sciences Team internationales OSTST, CFOSAT et SWOT renouvelées tous les 4 ans. Un effet structurant de ces groupes a été de tisser des liens entre la communauté spatiale et des communautés menant des expériences in-situ (campagnes à la mer, aéroporté, drones, ...). La pérennité de ces groupes mission a créé un point d'ancrage autour duquel les acteurs

des différentes communautés peuvent continuer à se retrouver. Le revers de la médaille est que cette ouverture à des communautés jusqu'alors peu tournées vers le spatial (e.g. hydrologie) a fait grossir considérablement le nombre d'utilisateurs potentiels. L'exemple de SWOT est en ce sens emblématique car, si la réunion des communautés océan et hydrologie au sein d'une même équipe scientifique était nécessaire lors la préparation de la mission, elle risque d'être difficile à gérer à moyen terme du fait du nombre croissant d'utilisateurs. L'OSTST vit aussi depuis plusieurs années cette complexité avec une utilisation croissante de l'altimétrie sur différentes surfaces (océan, surfaces continentales, cryosphère). Une réflexion de fond est donc nécessaire afin de fédérer ces communautés en ce qui concerne la physique de la mesure (e.g. l'altimétrie) tout en ne bridant pas ces communautés variées qui n'ont pas forcément les mêmes objectifs scientifiques ni les mêmes besoins.

Exploitation des données

- Le retraitement des longues séries de données multi-capteurs pour l'ensemble des variables climatiques essentielles (ECVs), la qualification des incertitudes et l'exploitation scientifique (au niveau d'une ECV donnée mais aussi en cross-ECVs et sur les "tipping points") de ces séries temporelles est une composante essentielle des études sur le climat. Ces travaux sont organisés à l'échelle européenne dans le cadre du programme CCI+ (maintenant Climate Space) avec un lien avec le programme Copernicus pour les aspects opérationnalisation (Copernicus Climate Change Service/ECMWF en interaction pour l'océan avec le Copernicus Marine Service/MO*i*). Le CNES a joué et joue un rôle majeur en amont de ces actions pour assurer un retraitement continu et à l'état de l'art des données altimétriques. La communauté nationale s'est bien engagée sur ces initiatives notamment pour le niveau de la mer, les vagues et la salinité de surface. Le retraitement des longues séries de données altimétriques pour calculer les tendances en côtier a fortement progressé grâce au Groupe de Travail Côtier dédié et le soutien du CNES et le CTOH. Il reste à clarifier les responsabilités précises des agences nationales, européennes (ESA, Eumetsat et la CE pour Copernicus) pour s'assurer de la poursuite et la consolidation de ces activités.

Pôle de données et plateformes DIAS

- Depuis le séminaire SPS du Havre, une évolution majeure du paysage des plateformes numériques pour le spatial et les services a vu le jour. Les 4 plateformes DIAS de l'ESA sont maintenant rassemblées dans le Copernicus Data Space Ecosystem. La plate-forme WEKEO (Eumetsat, ECMWF, MO*i* et EEA) se focalise sur l'accès joint aux données Sentinel et aux données des services Copernicus Marine. Le développement du programme Destination Earth (DestinE) de la CE (DG CNECT avec ECMWF, Eumetsat et l'ESA) et de son data lake, le programme ESA Digital Twin Earth (DTE) en complément de DestinE, la mise en place d'un jumeau numérique océan européen (dans le cadre de la mission Océan de la DG RTD et une coordination de MO*i*) apportent une nouvelle dimension incluant le lien avec les capacités de calcul (HPC), les méthodes d'AI et les services utilisateurs (scenarios).
- Au niveau national, l'IR Data Terra et ses quatre pôles, dont ODATIS pour l'océan et le domaine côtier, se structure actuellement via la mise en place de financement PIA (projet Gaia Data). Le pôle ODATIS a consolidé son organisation, ajouté des partenaires, et ajusté sa gouvernance. Les services rendus ODATIS pour l'océan sont maintenant établis et parfois labellisés, avec des nouveautés en cours de développement (e.g. hébergement cloud, interopérabilité, mise en production d'algorithmes de recherche, etc.). La mise en cohérence des différents pôles reste nécessaire pour bien servir la communauté climat. Dans ce contexte, les contributions du CNES ont été variées, par exemple au travers des projet PEPS ou SWOT et leurs capacités structurantes et leur force d'entraînement (e.g. services de démonstration, hébergement cloud, ou production spécialisées). L'ensemble des contributions du CNES doit progressivement s'insérer via l'IR Data Terra dans un GeoDataHub fédérateur pour la valorisation des données OT (accès et fourniture de services pour leur utilisation) qui sera interconnecté aux niveaux national et européen et aux nombreuses communautés d'utilisateurs.

4. ACTIVITES CAL/VAL ET OBSERVATIONS IN-SITU

Les observations in situ sont un élément crucial pour l'étalonnage-validation des mesures satellitaires océaniques. Leur étalonnage-validation s'appuie sur des expériences dédiées (e.g. SWOT AdAC, <https://www.swot-adac.org>), des sites d'étalonnage dédiés (e.g. FOAM From Ocean to inland waters Altimetry Monitoring ; [BOUSSOLE \(obs-vlfr.fr\)](https://obs-vlfr.fr) ; [Copernicus ocean colour vicarious calibration infrastructure EUMETSAT](https://eumetsat.int/OC-SVC-locations)) mais aussi sur des réseaux d'observations récurrentes. Ces derniers permettent une surveillance sur le long terme avec des résolutions spatio-temporelles variées, de l'échelle globale avec une résolution spatiale limitée (e.g., 3°x3° Argo) mais avec un nombre important de colocalisation in-situ/satellite possibles, le long de transects finement échantillonnés spatialement (e.g. bateaux marchands) ou encore en points fixes avec une haute résolution temporelle (e.g. mouillages). Le maintien des observations in situ et de leur contrôle qualité à haut niveau est un point clé dont dépend in fine la qualité des mesures satellitaires et pour lesquels les IR et Services Nationaux d'Observation (SNOs) jouent un rôle très important au niveau national en lien avec les actions au niveau européen (e.g. infrastructures de recherche européennes, EEOS) et internationales (GOOS). La plupart des mesures côtières sont intégrées dans l'Infrastructure de Recherche (IR) Illico. En revanche, la plupart des mesures hauturières, exceptées les mesures Argo, reposent sur des SNOs (e.g. SSS, GO-SHIP/OVIDE, PIRATA, MEMO) qui ne sont pas intégrés dans une infrastructure de recherche (l'IR OHIS n'ayant toujours pas été labellisée) et pour lesquels il est crucial d'assurer la pérennité des moyens et des financements. Certaines observations importantes pour les activités Cal/Val ne sont pas non plus labellisées/labellisables en SNOs ou IRs (réseaux opérationnels Météo France, Shom ou Cerema). La mise en place du cluster d'infrastructures d'observations Fr-OOS (French Ocean Observing System) qui apporte une coordination nationale de l'observation océan à long terme et inclut le CNES dans sa gouvernance va permettre de traiter ces questions de façon coordonnée.

Des recommandations CNES/TOSCA pour les missions altimétriques du programme Copernicus ont été proposées dans le cadre du projet Copernicus Cal/Val Solution (CCVS, <https://www.ccvs.eu>) financé par l'Union européenne. Le projet s'est concentré sur l'étalonnage et la validation de l'altimétrie au nadir, en traitant toutes les surfaces et les différentes composantes de la topographie (y compris l'orbite et la correction de la troposphère humide). Une autre initiative importante est menée par l'ESA concernant la validation des surfaces et des produits terrestres. Le projet St3TART (<https://sentinel3-st3tart.noveltis.fr>), soutenu par le CNES a émis des recommandations pour la construction de données FRM (Fiducial Reference Measurement) durables à des fins de validation altimétrique sur les eaux intérieures, les glaces de mer et les glaces terrestres dans le cadre du programme Copernicus (Da Silva, 2023).

Eumetsat qui est en charge de l'exploitation des satellites océan pour Copernicus a, par ailleurs, mené une analyse détaillée sur les sites de calibration pour les missions couleur de l'océan (<https://www.eumetsat.int/OC-SVC-locations>) qui devraient être soutenues dans un cadre Copernicus.

Notons enfin une contribution de l'ESA via le financement de plateformes de validation, tel que la plateforme 'SMOS Pilot-Mission Exploitation Platform (Pi-MEP)', qui outre la fourniture d'outils et de rapports de validation à partir d'un très large ensemble de données in situ et satellitaires, fournit une aide très précieuse pour la qualification des mesures, en particulier en provenance de centres de données étrangers, mais là non plus, la pérennité du financement n'est pas assurée.

Au niveau national, le centre de données ODATIS, outre la fourniture d'un catalogue de données, a fédéré des centres d'expertises notamment autour de la couleur de l'eau.

A noter enfin les actions menées par le groupe TOSCA Ocean pour l'évaluation scientifique du dossier Polar Pod dont une partie du volet instrumental a été soutenu financièrement par le CNES. Le potentiel du Polar Pod pour la validation et l'interprétation des mesures des missions d'océanographie spatiale est important. Le groupe TOSCA/Ocean a souligné la nécessité de préparer un plan d'implémentation détaillant les moyens à affecter pour chaque type d'instrumentation allant de la mise en œuvre de l'instrumentation, le suivi qualité et la qualification

des données, la mise à disposition des données et leur exploitation scientifique. Ce plan est une condition essentielle à la faisabilité et au succès du projet notamment sur son volet spatial.

A noter enfin que des questions éthiques se posent de façon de plus en plus prégnantes auprès des scientifiques, comme la multiplicité des opportunités via des partenariats avec des acteurs non académiques, les demandes multiples de communication sur le thème du changement climatique, ou encore les pratiques de la recherche vis-à-vis de l’empreinte carbone, ce qui a par exemple conduit à la création d’un comité d’éthique au CNRS.

5. ACCOMPAGNEMENT DE LA RECHERCHE SPATIALE

Le CNES a continué de bien soutenir via le TOSCA les équipes françaises impliquées dans les missions d’océanographie spatiale. Le CNES a par ailleurs, comme préconisé lors de la prospective 2019, poursuivi avec succès son accompagnement de la recherche pour la filière altimétrique intégrée dans Copernicus et s’étendant maintenant à l’altimétrie à fauchée avec SWOT et dans le futur S3 NG TOPO.

Cet accompagnement du CNES est essentiel pour la préparation des missions futures, la réussite des missions en vol et de leur exploitation scientifique et du lien vers les applications. Le bilan est très positif et la communauté nationale reste compétitive sur ces sujets et force de proposition. La situation est cependant fragile et certaines compétences clés reposent souvent sur quelques individualités. Il reste un problème de fond au niveau des ressources pérennes dans les laboratoires, le recours systématique aux CDDs n’étant pas une solution permettant de pérenniser des compétences notamment sur les aspects instrumentation, physique de la mesure et algorithmie. En regard du nombre de missions actuelles ou futures (notamment dans Copernicus qui devrait opérer près de 30 satellites en post 2030), les nouvelles missions Earth Explorer et le développement de la filière du New Space un renforcement du support aux équipes françaises impliquées dans la préparation des futures missions et l’exploitation des données des missions en vol est indispensable.

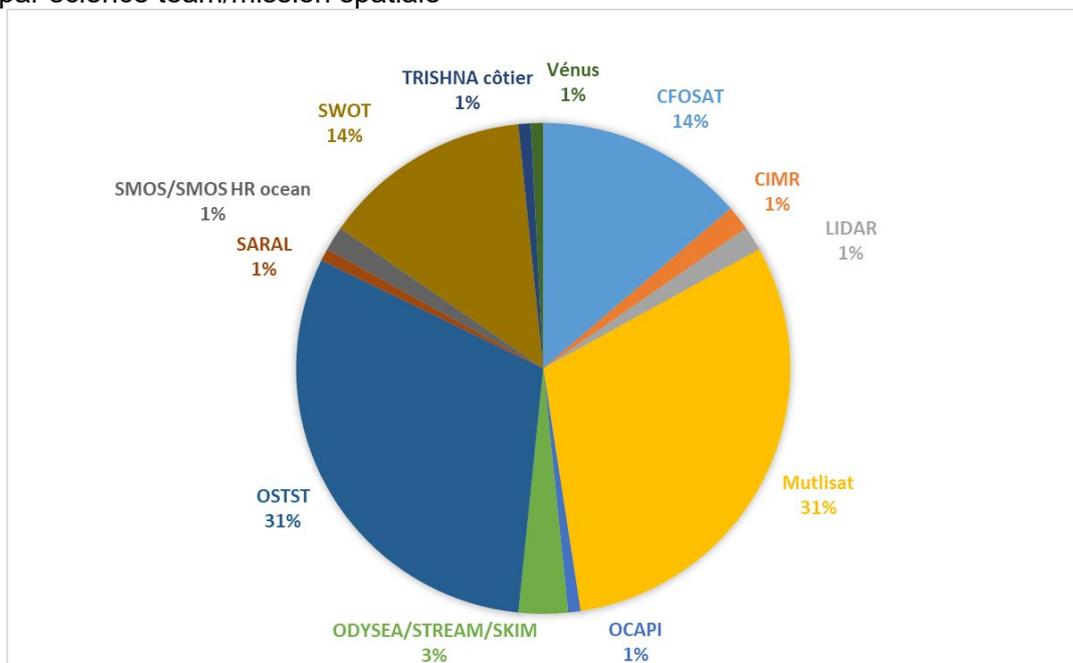
ANNEXE 1 : BILAN DES PROJETS APR, POST DOCS ET THESES

Sur la période 2019-2023 (hors sélection projets APR 2024) le groupe TOSCA/océan a évalué 127 projets APR distincts (évaluation scientifique et budgétaire). Concernant l'évaluation budgétaire, cela a représenté 174 demandes budgétaires distinctes, incluant 47 demandes budgétaires de co-l.

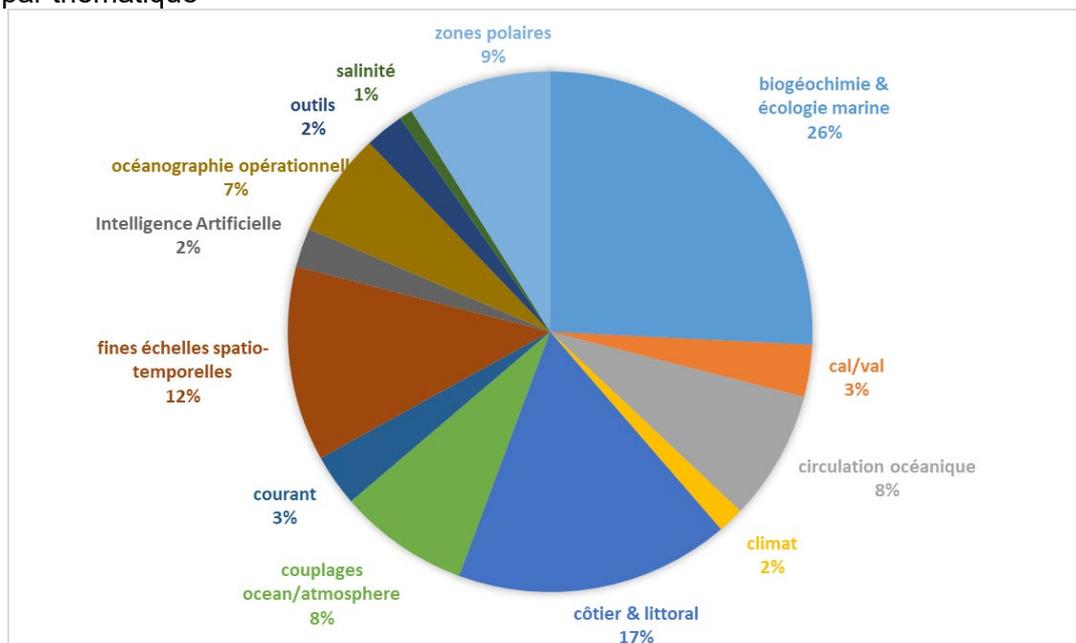
Sur ces 127 projets, 3 projets ont été refusés.

Répartition des 124 projets APR sélectionnés :

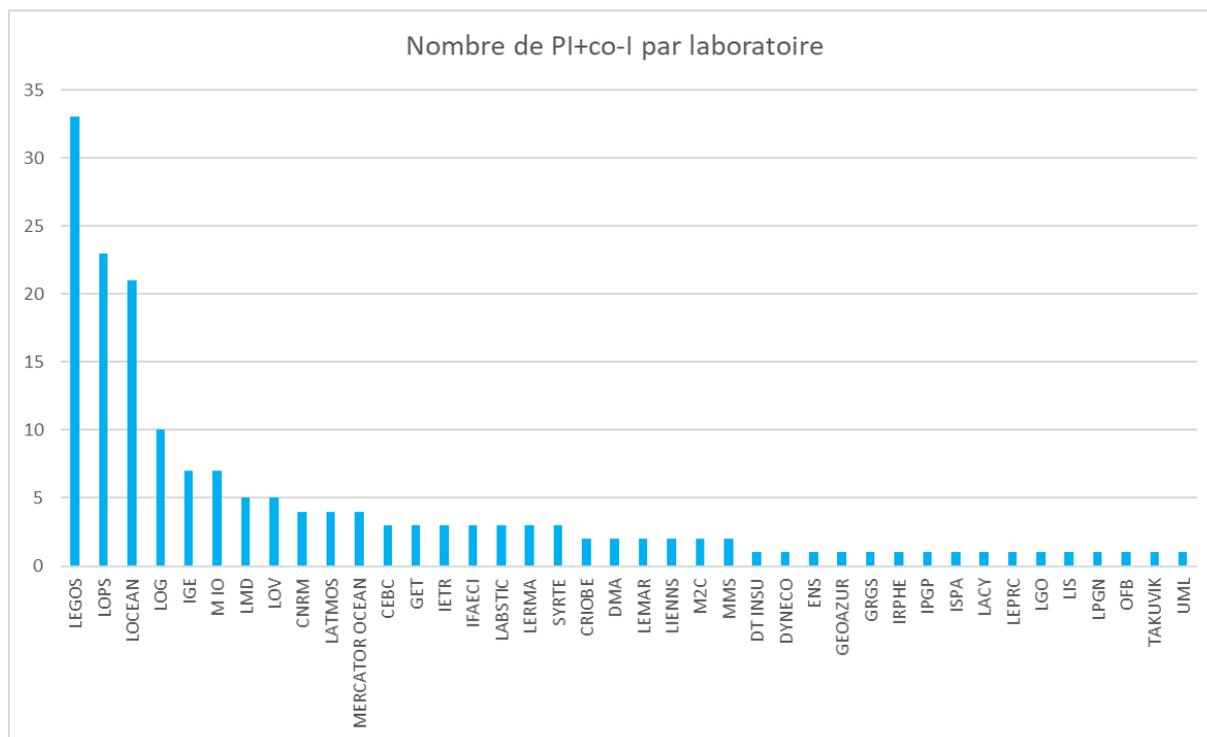
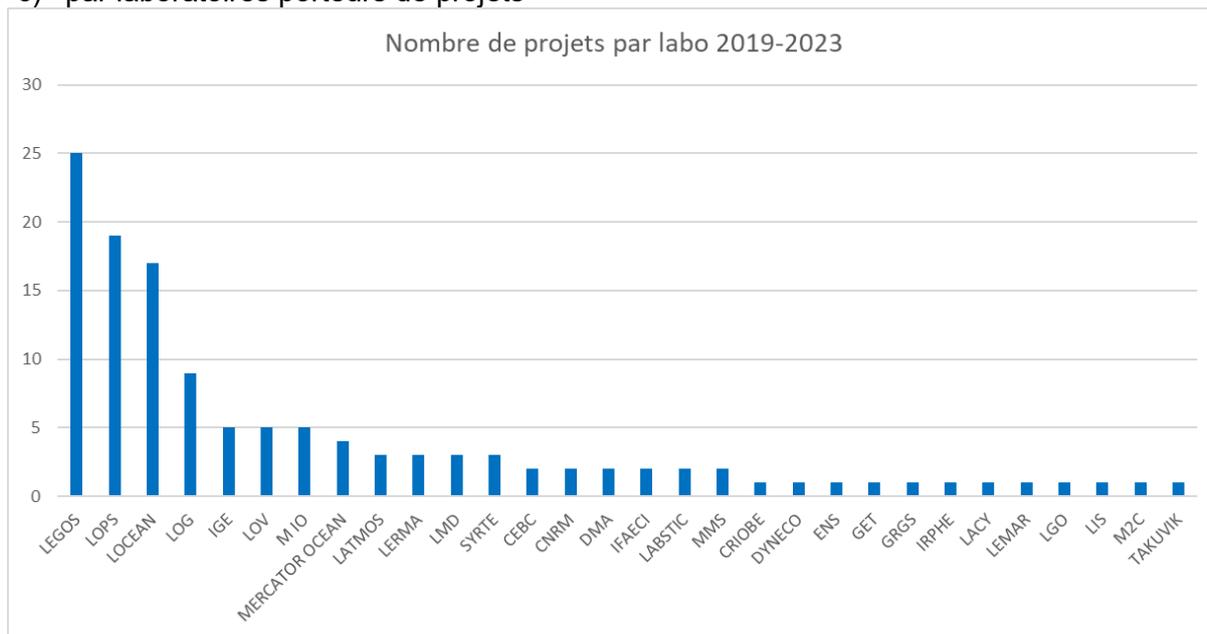
a) par science team/mission spatiale



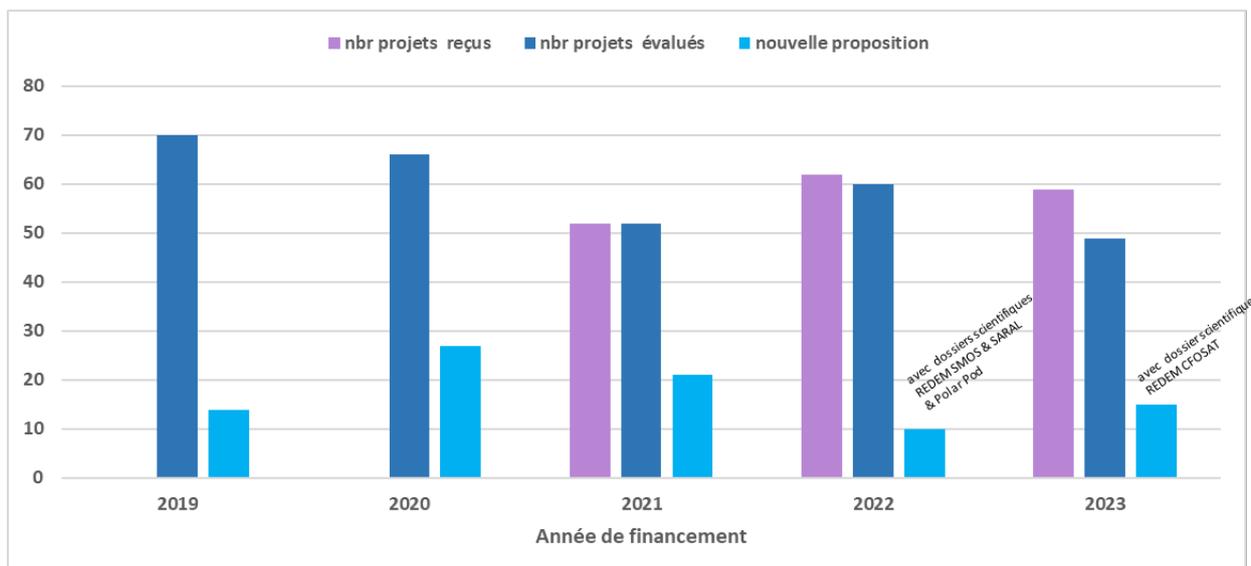
b) par thématique



c) par laboratoires porteurs de projets



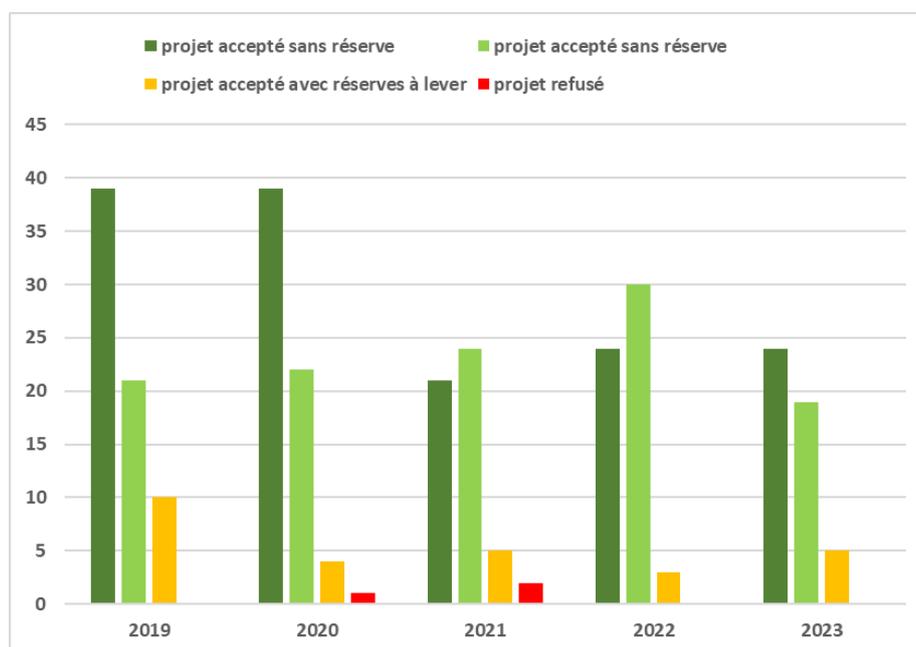
Ci-après la répartition annuelle des projets reçus, évalués ainsi que les nouvelles propositions. Cela inclut aussi les évaluations des dossiers scientifiques REDEM ou autre (Polar Pod).



Chaque année des projets nouveaux sont soumis via l'appel à recherche annuel APR soit via un appel à recherche de renouvellement de science team (OSTST, CFOSAT ou SWOT). Pour les nouveaux projets et les projets engagés, une évaluation annuelle est réalisée par le comité TOSCA. Tout projet APR évalué est soit :

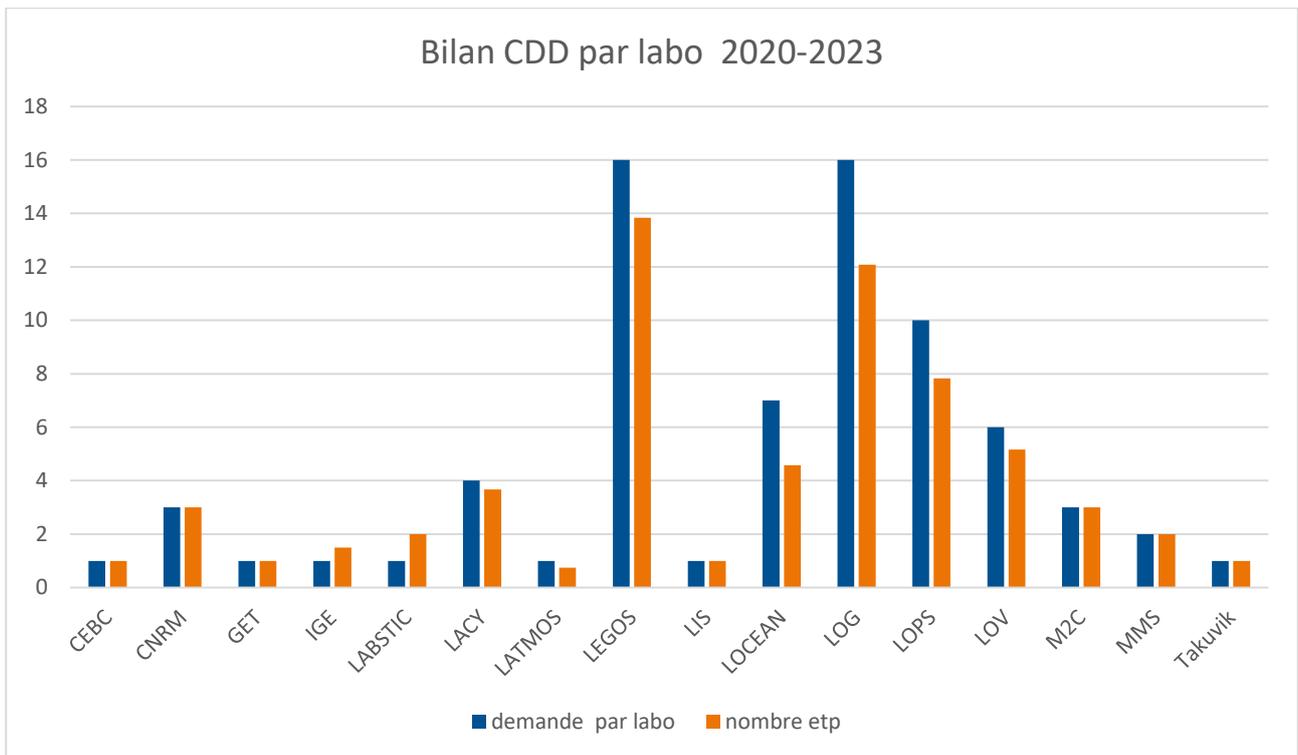
- Accepté sans réserve (notation : science/ressources : A/A)
- Acceptés avec réserves (notation : A/A-, A-/A, A-/A-)
- Acceptés avec réserves à lever (notation : */B, B/*; B/B)
- Refusé (notation : C)

Ci-après la répartition annuelle des notations des projets APR :



Bilan CDD

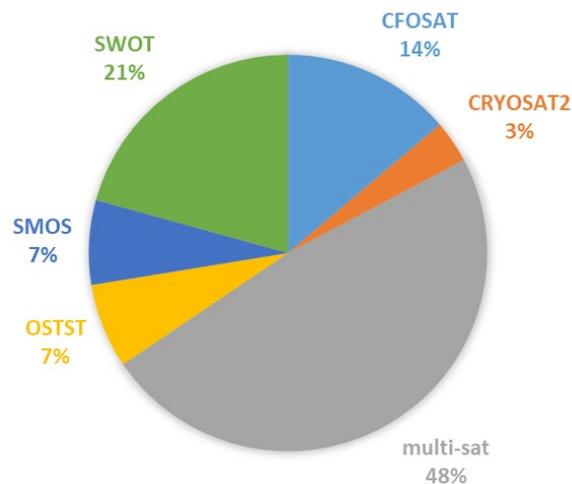
De 2020 à 2023 : 74 demandes de CDD de 2 à 24 mois financées par le CNES, représentant 17 ingénieurs d'études et 57 ingénieurs de recherche. La répartition par laboratoire est donnée ci-dessous :



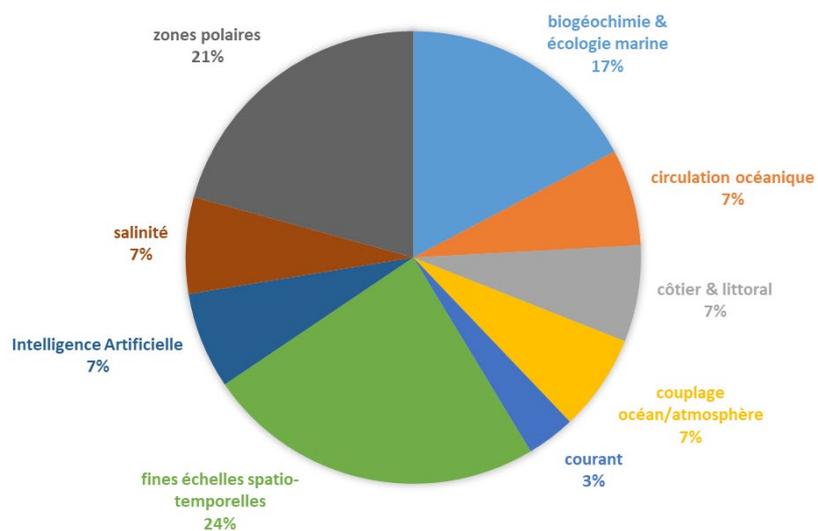
Bilan docs/post-docs

- Sélection 2018 à 2022 avec mise en place 2019-2023: 29 dossiers dont 17 docs et 12 post-docs.
- 5 embauches CDI.
- 2 arrêts en cours de thèse et un changement de ville/labo pour un doctorant pour raison familiale.

a) Répartition par science team/mission spatiale



b) Répartition par thème



ANNEXE 2 : PUBLICATIONS PRINCIPALES DE LA COMMUNAUTE TOSCA / OCEAN

- Ablain, M., Meyssignac, B., Zawadzki, L., Jugier, R., Ribes, A., Spada, G., Benveniste, J., Cazenave, A., and Picot, N. (2019). Uncertainty in satellite estimates of global mean sea-level changes, trend and acceleration, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1189–1202, doi:10.5194/essd-11-1189-2019
- Alboody, A., Puigt, M., Roussel, G., Vantrepotte V., Jamet, C., & Tran, T. K. (2021). Experimental comparison of multi-sharpening methods applied to Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI images, in *Proc. of the 11th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolutions in Remote Sensing (IEEE WHISPERS 2021)*, Amsterdam, Netherlands.
- Almar R., J. Boucharel, M. Graffin, G. Ondo Abessolo, G. Thoumyre, F. Papa, R. Ranasinghe, J. Montano, E. W.J. Bergsma, M. Wassim Baba, F.F. Jin (2023). Influence of El Niño on the variability of global shoreline position, *Nature Communications*, doi :10.1038/s41467-023-38742-9.
- Alory, G., C. Y. Da-Allada, S. Djakouré, I. Dadou, J. Jouanno, and D. P. Loemba (2021). Coastal Upwelling Limitation by Onshore Geostrophic Flow in the Gulf of Guinea Around the Niger River Plume, *Frontiers in Marine Science*, 7(1116), doi:10.3389/fmars.2020.607216.
- Aouf L., D. Hauser, B. Chapron, A. Toffoli, C. Tourrain, C. Peureux (2021). New directional wave satellite observations: Towards improved wave forecasts and climate description in Southern Ocean, *Geophys. Res. Letter*, special collection, doi : 10.1029/2020GL091187.
- Aouf L., J. Wang, D. Hauser, B. Chapron and C. Tourrain (2022). On the Assimilation of Wide Swath Significant Wave Height and Directional Wave Observations in Wave Model: Perspective for Operational Use, *IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2022, pp. 6772-6774, doi: 10.1109/IGARSS46834.2022.9883877.
- Ardyna, M., and K. R. Arrigo (2020). Phytoplankton dynamics in a changing Arctic Ocean. *Nature Climate Change* 10: 892-903.
- Ardyna, M., D. S. Hamilton, T. Harmel, L. Lacour, D. N. Bernstein, J. Laliberté, C. Horvat, R. Laxenaire, M. M. Mills, G. van Dijken, I. Polyakov, H. Claustre, N. Mahowald, and K. R. Arrigo (2022). Wildfire aerosol deposition likely amplified a summertime Arctic phytoplankton bloom. *Communications Earth & Environment* 3: 201.
- Assene, F., Koch-Larrouy A., Dadou, M. Tchilibou, G. Morvan, J Chanut, A. Costa da Silva, V. Vantrepotte, D. Allain, T.-K. Tran, et al. (2023). Internal tides impact on the sea surface temperature off the Amazon shelf, doi:10.5194/egusphere-2023-418.
- Ayouche A, Charria G, Carton X, Ayoub N and Theetten S. (2021). Non-Linear Processes in the Gironde River Plume (North-East Atlantic): Instabilities and Mixing. *Front. Mar. Sci.* 8:701773. doi: 10.3389/fmars.2021.701773.
- Balaguru, K., Foltz, G. R., Leung, L. R., Kaplan, J., Xu, W., Reul, N., et al. (2020). Pronounced impact of salinity on rapidly intensifying tropical cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(9), E1497–E1511. doi:10.1175/BAMS-D-19-0303.1.
- Barnoud, A., Pfeffer, J., Cazenave, A., and Ablain, M. (2022) Revisiting the global mean ocean mass budget over 2005–2020, *EGUsphere* [preprint], doi:10.5194/egusphere-2022-716..
- Barnoud, A., Picard, B., Meyssignac, B., Marti, F., Ablain, M., & Roca, R. (2023). Reducing the uncertainty in the satellite altimetry estimates of global mean sea level trends using highly stable water vapor climate data records. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128, e2022JC019378. <https://doi-org.insu.bib.cnrs.fr/10.1029/2022JC019378>.
- Beauchamp, M., Febvre, Q., Georgenthum, H., and Fablet, R. (2023). 4DVarNet-SSH: End-to-end learning of variational interpolation schemes for nadir and wide-swath satellite altimetry. *Geoscientific Model Development*, 16 (8), 2119–2147. doi: 10.5194/gmd-16-2119-2023
- Bendinger A., S. Cravatte, L. Gourdeau, L. Brodeau, A. Albert, M. Tchilibou, F. Lyard, and C. Vic (2023). Regional modeling of internal tide dynamics around New Caledonia. Part I: Coherent internal tide characteristics and sea surface height signature, *EGUsphere*, doi:10.5194/egusphere-2023-361.
- Benkiran, M., Ruggiero, G., Greiner, E., Le Traon, P. Y., Rémy, E., Lellouche, J. M., Tchonang, B. (2021). Assessing the impact of the assimilation of swot observations in a global high-

- resolution analysis and forecasting system part 1: Methods. *Frontiers in Marine Science*, 8, 691955.
- Birol et al. (2022). Round Robin Assessment of altimetry algorithms for coastal sea surface height data. OSTST 2022. <http://dx.doi.org/10.24400/527896/a03-2022.3363>.
- Birol F., Léger F., Passaro M., Cazenave A., Niño F., Calafat F.M., Shaw A., Legeais J-F., Gouzenes Y., Schwatke C., Benveniste J. (2021). The X-TRACK/ALES multi-mission processing system: New advances in altimetry towards the coast, *Advances in Space Research*, Vol 67, Issue 8, doi:10.1016/j.asr.2021.01.049.
- Bocquet M., S. Fleury, F. Rémy, F. Piras (2024), Arctic and Antarctic sea ice thickness and changes from observations between 1994 and 2023, submitted to *JGR-Oceans*.
- Bocquet, M., Fleury, S., Piras, F., Rinne, E., Sallila, H., Garnier, F., and Rémy, F. (2023). Arctic sea ice radar freeboard retrieval from the European Remote-Sensing Satellite (ERS-2) using altimetry: toward sea ice thickness observation from 1995 to 2021, *The Cryosphere*, 17, 3013–3039, doi:10.5194/tc-17-3013-2023.
- Bonelli, A. G., V. Vantrepotte, D. Schaffer Ferreira Jorge, J. Demaria, C. Jamet, D. Dessailly, A. Mangin, O. Fanton d'Andon, E. Kwiatkowska, and H. Loisel (2021). Colored dissolved organic matter absorption at global scale from ocean color radiometry observation: spatio-temporal variability and contribution to the absorption budget. *Remote Sensing of Environment* 265(265):112637. DOI: 10.1016/j.rse.2021.112637.
- Bonelli, A. G., Loisel, H., Jorge, D. S., Mangin, A., d'Andon, O. F., & Vantrepotte, V. (2022). A new method to estimate the dissolved organic carbon concentration from remote sensing in the global open ocean. *Remote Sensing of Environment*, 281, 113227.
- Boutin, J., S. Yueh, R. Bindlish, S. Chan, D. Entekhabi, Y. Kerr, N. Kolodziejczyk, T. Lee, N. Reul, M. Zribi (2023). Soil Moisture and Sea Surface Salinity Derived from Satellite-Borne Sensors, *Surveys in Geophysics*, doi :10.1007/s10712-023-09798-5.
- Carret, A., Birol, F., Estournel, C., and Zakardjian, B. (2023). Assessing the capability of three different altimetry satellite missions to observe the Northern Current by using a high-resolution model, *Ocean Sci.*, 19, 903–921, doi:10.5194/os-19-903-2023.
- Cazenave A, Moreira L. (2022). Contemporary sea-level changes from global to local scales: a review. *Proc. R. Soc. A478:20220049*. doi:10.1098/rspa.2022.0049.
- Cesbron G., Melet A., Almar R., Lifermann A., Tullo 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.
- Chevalier L., D. Desroches, B. Laignel, R. Fjortoft, I. Turki, D. Allain, F. Lyard, D. Blumstein, E. Salameh (2019). High-Resolution SWOT Simulations of the Macrotidal Seine Estuary in Different Hydrodynamic Conditions in *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 16, no. 1, pp. 5-9, Jan. 2019, doi: 10.1109/LGRS.2018.2862470
- Cissé, C. T., Alboody, A., Puigt, M., Roussel, G., Vantrepotte V., Jamet, C., & Tran, T. K. (2022). A new deep learning method for multispectral image time series completion using hyperspectral data, in *Proc. 47th IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP 2022)*, Singapore / Virtual.
- Cissé, C. T., Puigt, M., Alboody, A., Delmaire, G., Roussel, G., Vantrepotte V., Jamet, C., & Tran, T. K. (2022). Enhanced tensor-based multi-sharpening methods for Sentinel-2 MSI and Sentinel-3 OLCI images, *12th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolutions in Remote Sensing (IEEE WHISPERS 2022)*.
- Da Silva, E., Woolliams, E.R., Picot, N., Poisson, J.-C., Skourup, H., Moholdt, G., Fleury, S., Behnia, S., Favier, V., Arnaud, L., et al. (2023). Towards Operational Fiducial Reference Measurement (FRM) Data for the Calibration and Validation of the Sentinel-3 Surface Topography Mission over Inland Waters, Sea Ice, and Land Ice. *Remote Sens.*, 15, 4826. doi:10.3390/rs15194826.
- Dibarboure G, Ubelmann C, Flamant B, Briol F, Peral E, Bracher G, Vergara O, Faugère Y, Soulat F, Picot N. (2022). Data-Driven Calibration Algorithm and Pre-Launch Performance Simulations for the SWOT Mission. *Remote Sensing*; 14(23):6070. doi:10.3390/rs14236070.
- D'Ovidio F., Pascual A., Wang J., Doglioli A. M., Jing Z., Moreau S., Grégori G., Swart S., Speich S., Cyr F., Legresy B., Chao Y., Fu L.L., Morrow R. (2019). *Frontiers in Fine-Scale in situ Studies: Opportunities During the SWOT Fast Sampling Phase*, *Frontiers in Marine Science*, DOI=10.3389/fmars.2019.00168.

- Fablet R., B. Chapron, J. Le Sommer and F. Sevellec (2023). Inversion of sea surface currents from satellite-derived SST-SSH synergies with 4DVarNets. Submitted to the Journal of Advances in Modeling Earth Systems, preprint on arXiv:2211.13059.
- Fassoni-Andrade A.C., F. Durand, A. Azevedo, X. Bertin, L. Guedes Santos, J. Uddin Khan, L. Testut, D. Medeiros Moreira (2023). Seasonal to interannual variability of the tide in the Amazon estuary, *Continental Shelf Research*, Vol. 255, doi:10.1016/j.csr.2023.104945.
- Febvre Q., J. Le Sommer, C. Ubelmann and R. Fablet (2023). Training neural mapping schemes for satellite altimetry with simulation data. <https://arxiv.org/abs/2309.14350>.
- Gali, M., E. Devred, M. Babin, and M. Levasseur (2019). Decadal increase in Arctic dimethylsulfide emission. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 116: 19311-19317.
- Garnier, F., Fleury, S., Garric, G., Bouffard, J., Tsamados, M., Laforge, A., Bocquet, M., Fredensborg Hansen, R. M. and Rémy, F. (2021). Advances in altimetric snow depth estimates using bi-frequency SARAL and CryoSat-2 Ka-Ku measurements. *The Cryosphere* 2021, doi:10.5194/tc-15-5483-2021.
- Gasparin F., Lellouche J.-M., Cravatte S.E., Ruggiero G., Rohith B., Le Traon P.-Y. and Rémy E. (2023). On the control of spatial and temporal oceanic scales by existing and future observing systems: An observing system simulation experiment approach. *Front. Mar. Sci.* 10:1021650. doi:10.3389/fmars.2023.1021650.
- Gévaudan, M., Durand, F., & Jouanno, J. (2022). Influence of the Amazon-Orinoco discharge interannual variability on the western tropical Atlantic salinity and temperature. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127, e2022JC018495. doi:10.1029/2022JC018495.
- Gouzenes, Y., Léger, F., Cazenave, A., Birol, F., Bonnefond, P., Passaro, M., Nino, F., Almar, R., Laurain, O., Schwatke, C., Legeais, J.-F., and Benveniste, J. (2020). Coastal sea level rise at Senetosa (Corsica) during the Jason altimetry missions, *Ocean Sci.*, 16, 1165–1182, doi:10.5194/os-16-1165-2020.
- Grodsky, S.A., N. Reul, A. Bentamy & D. Vandemark (2023). Anomalously fresh Chukchi Sea surface salinity in summer-autumn 2021, *Remote Sensing Letters*, 14:2, 135-147, DOI: 10.1080/2150704X.2022.2164231.
- Guérou, A., Meyssignac, B., Prandi, P., Ablain, M., Ribes, A., and Bignalet-Cazalet, F.: Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated measurement uncertainty (2023). *Ocean Sci.*, 19, 431–451, doi:10.5194/os-19-431-2023.
- Guérou, A., Meyssignac, B., Prandi, P., Ablain, M., Ribes, A., and Bignalet-Cazalet, F. (2022). Current observed global mean sea level rise and acceleration estimated from satellite altimetry and the associated uncertainty, *EGUsphere* [preprint].
- Haëck, C., Lévy, M., Mangolte, I., and Bopp, L. (2023). Satellite data reveal earlier and stronger phytoplankton blooms over fronts in the Gulf Stream region, *Biogeosciences*, 20, 1741–1758, doi:10.5194/bg-20-1741-2023.
- International Altimetry Team (2021). Altimetry for the Future: Building on 25 Years of Progress, *Advances in Space Research*, Special Issue « 25 Years of Progress in Radar Altimetry », doi:10.1016/j.asr.2021.01.022.
- Khan J., Ansary N., Durand F., Testut L., Ishaque M., Calmant S., Krien Y., Islam S., Papa F. (2019). High-Resolution Intertidal Topography from Sentinel-2 Multi-Spectral Imagery: Synergy between Remote Sensing and Numerical Modeling. *Remote Sensing* 11, no. 24: 2888. doi:10.3390/rs11242888.
- Khan, Md. J. U., Durand, F., Bertin, X., Testut, L., Krien, Y., Islam, A. K. M. S., Pezerat, M., and Hossain, S. (2021). Towards an efficient storm surge and inundation forecasting system over the Bengal delta: chasing the Supercyclone Amphan, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21, 2523–2541, doi:10.5194/nhess-21-2523-2021.
- Kim, YH., Min, SK., Gillett, N.P. et al. (2023). Observationally-constrained projections of an ice-free Arctic even under a low emission scenario. *Nat Commun* 14, 3139. doi:10.1038/s41467-023-38511-8.
- Kouraev, A. V., Zakharova, E. A., Kostianoy, A. G., Shimaraev, M. N., Desinov, L. V., Petrov, E. A., Hall, N. M. J., Rémy, F., and Suknev, A. Ya (2021). Giant ice rings in Southern Baikal: multi-satellite data help to study ice cover evolution and eddies under ice, *The Cryosphere*, 15, p. 4501–4516, doi:10.5194/tc-15-4501-2021

- Lacour, L., R. Larouche, and M. Babin (2020). In situ evaluation of spaceborne CALIOP lidar measurements of the upper-ocean particle backscattering coefficient. *Optics Express* 28: 26989-26999.
- Laignel, B. S. Vignudelli, R. Almar, M. Becker, A. Bentamy, et al. (2023). Observation of the Coastal Areas, Estuaries and Deltas from Space. *Surveys in Geophysics*, 2023, 10.1007/s10712-022-09757-6.
- Laliberte, J., E. Rehm, B. Hamre, C. Goyens, D. K. Perovich, and M. Babin (2022). A method to derive satellite PAR albedo time series over first-year sea ice in the Arctic Ocean. *Elementa-Science of the Anthropocene* 10.
- Laxenaire, R., Speich, S., Blanke, B., Chaigneau, A., Pegliasco, C., and Stegner, A. (2018). Anticyclonic Eddies Connecting the Western Boundaries of Indian and Atlantic Oceans. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 123, 7651–7677. 10.1029/2018JC014270.
- Le Guillou, F., Lahaye, N., Ubelmann, C., Metref, S., Cosme, E., Ponte, A. et al. (2021). Joint estimation of balanced motions and internal tides from future wide-swath altimetry. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2021MS002613. doi:10.1029/2021MS002613.
- Loisel, H., Duforêt-Gaurier, L., Tran, T. K., Schaffer Ferreira Jorge, D., Steinmetz, F., Mangin, A., Bretagnon, M., and Hembise Fanton d'Andon, O. (2023). Characterization of the organic vs. inorganic fraction of suspended particulate matter in coastal waters based on ocean color radiometry remote sensing, in: 7th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR7), edited by: von Schuckmann, K., Moreira, L., Le Traon, P.-Y., Grégoire, M., Marcos, M., Staneva, J., Brasseur, P., Garric, G., Lionello, P., Karstensen, J., and Neukermans, G., Copernicus Publications, State Planet, 1-osr7, 11, doi:10.5194/sp-1-osr7-11-2023.
- Lyard, F., Allain, D., Cancet, M., Carrère, L, Picot N. (2021). FES2014 global ocean tides atlas: design and performances, *Ocean Sci.*, 17, 1–35, 2021, doi:10.5194/os-17-1-2021.
- Marti, F., Blazquez, A., Meyssignac, B., Ablain, M., Barnoud, A., Fraudeau, R., Jugier, R., Chenal, J., Larnicol, G., Pfeffer, J., Restano, M., and Benveniste, J. (2022). Monitoring the ocean heat content change and the Earth energy imbalance from space altimetry and space gravimetry, *Earth Syst. Sci. Data*, 14, 229–249. doi:10.5194/essd-14-229-2022
- Martin, M. J., E. Remy, B. Tranchant, R. R. King, E. Greiner & C. Donlon (2020). Observation impact statement on satellite sea surface salinity data from two operational global ocean forecasting systems, *Journal of Operational Oceanography*, doi: 10.1080/1755876X.2020.1771815.
- Matsuoka, A., M. Babin, and J. E. Vonk (2022). Decadal trends in the release of terrigenous organic carbon to the Mackenzie Delta (Canadian Arctic) using satellite ocean color data (1998–2019). *Remote Sensing of Environment* 283: 113322.
- McMahon CR, Roquet F, Baudel S, Belbeoch M, Bestley S, Blight C, Boehme L, Carse F, Costa DP, Fedak MA, Guinet C, et al. (2021). Animal Borne Ocean Sensors – AniBOS – An Essential Component of the Global Ocean Observing System. *Front. Mar. Sci.*, 05 November 2021 | doi:10.3389/fmars.2021.751840.
- Melet, A., Teatini, P., Le Cozannet, G., Jamet, C., Conversi, A., Benveniste, J. and Almar, R. (2020). Earth observations for monitoring marine coastal hazards and their drivers. *Surveys in Geophysics*, 41(6), pp.1489-1534, doi:10.1007/s10712-020-09594-5.
- Meyssignac, B., Ablain, M., Guérou, A. et al. (2023). How accurate is accurate enough for measuring sea-level rise and variability. *Nat. Clim. Chang.* 13, 796–803. doi:10.1038/s41558-023-01735-z.
- Morrow, R., Fu, L.-L., Arduin, F., Benkiran, M., Chapron, B., Cosme, E., d'Ovidio, F., Farrar, J.T., Gille, S.T., Lapeyre, G., et al. (2019). Global Observations of Fine-Scale Ocean Surface Topography With the Surface Water and Ocean Topography (SWOT) Mission. *Frontiers in Marine Science* 6, 232. 10.3389/fmars.2019.00232.
- Mulet, S., Rio, M.-H., Etienne, H., Artana, C., Cancet, M., Dibarboure, G., Feng, H., Husson, R., Picot, N., Provost, C., and Strub, P. T. (2021). The new CNES-CLS18 global mean dynamic topography, *Ocean Sci.*, 17, 789–808, doi:10.5194/os-17-789-2021.
- Nguyen-Duy T, Ayoub NK, De Mey-Frémaux P, Ngo-Duc T. (2023). How sensitive is a simulated river plume to uncertainties in wind forcing? A case study for the Red River plume (Vietnam). Submitted to *Ocean Modelling*.
- Olivier, L., Boutin, J., Reverdin, G., Lefèvre, N., Landschützer, P., Speich, S., Karstensen, J., Labaste, M., Noisel, C., Ritschel, M., et al. (2022). Wintertime process study of the North Brazil

- Current rings reveals the region as a larger sink for CO₂ than expected. *Biogeosciences* 19, 2969–2988. doi:10.5194/bg-19-2969-2022.
- Olivier, L., G. Reverdin, J. Boutin, R. Laxenaire, D. Iudicone, S. Pesant, Paulo H.R. Calil, J. Horstmann, D. Couet, J. M. Erta, P. Huber, H. Sarmento, A. Freire, A. Koch-Larrouy, J.-L. Vergely, P. Rousselot, S. Speich (2024). Late summer northwestward Amazon plume pathway under the action of the North Brazil Current rings, *Remote Sensing of Environment*, 307, 114165, doi:10.1016/j.rse.2024.114165.
- Oruba L., D. Hauser, S. Planes, E. Dormy (2022). Ocean waves in the South Pacific: complementarity of SWIM and SAR observations, *Earth and Space Sciences*, 2021EA002187-TR, doi:10.1029/2021EA002187 2022
- Oziel, L., A. Baudena, M. Ardyna, P. Massicotte, A. Randelhoff, J. B. Sallee, R. B. Ingvaldsen, E. Devred, and M. Babin (2020). Faster Atlantic currents drive poleward expansion of temperate phytoplankton in the Arctic Ocean. *Nature Communications* 11.
- Oziel, L., P. Massicotte, M. Babin, and E. Devred (2022). Decadal changes in Arctic Ocean Chlorophyll a: Bridging ocean color observations from the 1980s to present time. *Remote Sensing of Environment* 275.
- Prandi, P., Meyssignac, B., Ablain, M., G. Spada, A. Ribes and J. Benveniste (2021). Local sea level trends, accelerations and uncertainties over 1993–2019. *Sci Data* 8, 1. doi:10.1038/s41597-020-00786-7.
- Pujol M-I, Dupuy S, Vergara O, Sánchez Román A, Faugère Y, Prandi P, Dabat M-L, Dagneaux Q, Lievin M, Cadier E, et al. (2023). Refining the Resolution of DUACS Along-Track Level-3 Sea Level Altimetry Products. *Remote Sensing*; 15(3):793. doi:10.3390/rs15030793.
- Qinghua Yang et al. (2023). Better synoptic and subseasonal sea ice thickness predictions are urgently required: a lesson learned from the YOPP data validation *Environ. Res. Lett.* 18 071002. DOI 10.1088/1748-9326/acdcaa.
- Reul, N., S. Grodsky, M. Arias, J. Boutin et al. (2020). Sea surface salinity estimates from spaceborne L-band radiometers: An overview of the first decade of observation (2010–2019), *Remote Sensing of Environment*, vol. 242, p. 111769, 2020/06/01/ 2020, doi: doi:10.1016/j.rse.2020.111769.
- Renault, L., Arsouze, T., and Desbiolles, F. (2023). From a Local Air-Sea Interaction to a Large-Scale Control of Extra-Tropical Storm Tracks. *Nature Geoscience*, under review
- Reul N., Chapron B., Grodsky S. A., Guimbarde S., Kudryavtsev V., Foltz G. R., Balaguru K. (2021). Satellite observations of the sea surface salinity response to tropical cyclones. *Geophysical Research Letters*, 48(1), e2020GL091478 (10p.). doi:10.1029/2020GL091478
- Salameh E., Frappart F., Desroches D., Turki I., Carbonne D., Laignel B. (2021). Monitoring intertidal topography using the future SWOT (surface water and ocean topography) mission. *Remote Sens Appl Soc Environ* 23:100578. doi:10.1016/j.rsase.2021.100578.
- Salameh E., Frappart F., Turki I., Laignel B. (2020). Intertidal topography mapping using the waterline method from Sentinel-1 & -2 images: The examples of Arcachon and Veys Bays in France, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, doi:10.1016/j.isprsjprs.2020.03.003.
- Stephens, G., and Coauthors (2023). The First 30 Years of GEWEX. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 104, E126–E157., doi:10.1175/BAMS-D-22-0061.1..
- Supply, A., Boutin, J., Kolodziejczyk, N., Reverdin, G. Lique, C., Vergely, J.-L., Perrot, X. (2022). Meltwater lenses over the Chukchi and the Beaufort seas during summer 2019: from in-situ to synoptic view. *JGR-Oceans*, doi: 10.1029/2021JC018388.
- Tchonang B. C., Benkiran M., Le Traon P.Y., Jan van Gennip S., Lellouche J.M. and Ruggiero G. (2021). Assessing the Impact of the Assimilation of SWOT Observations in a Global High-Resolution Analysis and Forecasting System – Part 2: Results. *Front. Mar. Sci.* 8 :687414. doi: 10.3389/fmars.2021.687414.
- Supply, A., J. Boutin, J.-L. Vergely, N. Kolodziejczyk, G. Reverdin, N. Reul, and A. Tarasenko (2020). New insights into SMOS sea surface salinity retrievals in the Arctic Ocean, *Remote Sensing of Environment*, 249, 112027, doi:10.1016/j.rse.2020.112027.
- Tchilibou, M., Koch-Larrouy, A., Barbot, S., Lyard, F., Morel, Y., Jouanno, J., and Morrow, R. (2022). Internal tides off the Amazon shelf during two contrasted seasons: interactions with background circulation and SSH imprints, *Ocean Sci.*, 18, 1591–1618, doi:10.5194/os-18-1591-2022.

- Tchilibou, M., L Gourdeau, F Lyard, R Morrow, A Koch Larrouy, D Allain, B Djath (2020). Internal tides in the Solomon Sea in contrasted ENSO conditions, *Ocean Sci.*, 16, 615–635, doi:10.5194/os-16-615-2020.
- Thiria, S., Sorrow, C., Archambault, T., Charantonis, A., Bereziat, D., Mejia, C., Molines, J.-M., and Crépon, M. (2023). Downscaling of ocean fields by fusion of heterogeneous observations using Deep Learning algorithms. *Ocean Modelling* 182, 102174. 10.1016/j.ocemod.2023.102174.
- Toublanc F., N.K. Ayoub, P. Marsaleix (2023). On the role of wind and tides in shaping the Gironde River plume (Bay of Biscay). *Continental Shelf Research*, Vol. 253, doi: 10.1016/j.csr.2022.104891.
- Tournadre J., J.F.Piolle, M. Accensi and F. Girard-Ardhuin (2021). The ALTIBERG iceberg data base version 3.0, Antarctic and Arctic data sets. DOI: 10.13140/RG.2.2.10433.07521.
- Tran, M.D., Vantrepotte, V., Loisel, H., Oliveira, E.N., Tran, K.T., Jorge, D., Mériaux, X., Paranhos, R. (2023). Band Ratios Combination for Estimating Chlorophyll-a from Sentinel-2 and Sentinel-3 in Coastal Waters. *Remote Sens.*, 15, 1653.
- Tréboutte, A., Carli, E., Ballarotta, M., Carpentier, B., Faugère, Y., and Dibarboure, G. (2023). KaRIn Noise Reduction Using a Convolutional Neural Network for the SWOT Ocean Products, *Remote Sensing*, 15, 2183, doi:10.3390/rs15082183, number: 8 Publisher:Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Tzortzis, R., Doglioli, A.M., Barrillon, S., Petrenko, A.A., d'Ovidio, F., Izard, L., Thyssen, M., Pascual, A., Barceló-Llull, B., Cyr, F., et al. (2021). Impact of moderately energetic fine-scale dynamics on the phytoplankton community structure in the western Mediterranean Sea. *Biogeosciences* 18, 6455–6477. doi:10.5194/bg-18-6455-2021.
- Vergara, O., Morrow, R., Pujol, M.-I., Dibarboure, G., and Ubelmann, C. (2023). Global submesoscale diagnosis using along-track satellite altimetry. *Ocean Science* 19, 363–379. 10.5194/os-19-363-2023.
- Verron, J., Bonnefond, P., Andersen, O., Ardhuin, F., Bergé-Nguyen, M., Bhowmick, S., Blumstein, D., Boy, F., Brodeau, L., Crétaux, J.-F., Dabat, M., Dibarboure, G., Fleury, S., Garnier, F., Gourdeau, L., Marks, K., Queruel, N., Sandwell, D., Smith, W. H., Zaron, E.D. (2020). The SARAL/AltiKa mission: a step forward to the future of altimetry, *Advances in Space Research*, Special Issue « 25 Years of Progress in Radar Altimetry », doi:10.1016/j.asr.2020.01.030.
- Vient J-M, Fablet R, Jourdin F, Delacourt C. (2022). End-to-End Neural Interpolation of Satellite-Derived Sea Surface Suspended Sediment Concentrations. *Remote Sensing*; 14(16):4024. doi:10.3390/rs14164024.