

GROUPE THÉMATIQUE OCÉAN

Nadia Ayoub, Pascal Bonnefond, Jacqueline Boutin (Présidente groupe Océan entrant), Aurélien Carbonniere (thématicien côtier/cryosphère marine Cnes), Hervé Claustre, Casimir de Lavergne, Francesco d'Ovidio, Yann Drillet, Yannice Faugère (thématicien océan entrant Cnes), Cedric Jamet, Alexei Kouraev, Pierre-Yves Le Traon (Président groupe Océan sortant), Bertrand Lubac, Frédéric Nouguier, Ludivine Oruba, Annick Sylvestre-Baron (thématicienne océan sortant Cnes).

De nombreuses questions scientifiques demeurent sur notre compréhension du fonctionnement de l'océan, ce qui requiert de faire progresser les connaissances sur son évolution globale, ses couplages avec l'atmosphère, les zones polaires, le rôle des fines échelles océaniques, ses interfaces avec la surface terrestre, ses propriétés physiques, biogéochimiques et écologiques. Comprendre, surveiller et prévoir l'état de l'océan s'appuie sur la complémentarité entre mesures spatiales, in-situ et modélisation numérique. Outre le besoin de continuité d'observations spatiales, de nouvelles observables, des résolutions spatio-temporelles accrues et de nouveaux outils pour combiner ces larges ensembles d'informations (e.g. jumeaux numériques) sont nécessaires pour répondre à ces enjeux de connaissance, mieux évaluer le rôle de l'océan sur le climat et l'évolution de la biodiversité marine, et mieux guider les politiques environnementales et les mesures d'atténuation et d'adaptation au changement climatique. Les mesures in-situ permettent d'étalonner et de valider les mesures spatiales, d'apporter la dimension verticale, de documenter davantage de paramètres, et de donner un contexte historique à long terme. La modélisation permet de synthétiser ces informations via l'assimilation de données, de faire des prévisions à l'échelle de quelques mois, voire de plusieurs décennies, ou encore de développer des jumeaux numériques.

L'océan joue un rôle majeur sur le climat. Il stocke environ 90% de l'excès de chaleur reçu par la planète en raison de l'accroissement du CO₂ dans l'atmosphère et un quart des émissions de CO₂ générées par les activités humaines. Il est aussi le réceptacle d'énormes flux d'eaux douces, intensifiés par la fonte des glaces, et celui de multiples contaminants rejetés dans la mer via les fleuves. Ces apports engendrent des changements majeurs dans l'océan (e.g. réchauffement des océans, niveau de la mer, oxygène dissous, acidification) mettant en péril ses écosystèmes. De plus, l'occurrence d'évènements extrêmes s'est multipliée avec un impact direct sur les océans, comme les vagues de chaleur marine, des submersions côtières, des phénomènes de blanchissement des coraux, des blooms exceptionnels de phytoplancton, ou la prolifération anormale des sargasses ...

En réponse à ces enjeux majeurs, de nouvelles initiatives internationales aux plus hauts niveaux politiques ont été lancées, e.g. la décennie (2021-2030) des sciences océaniques des Nations Unies, le One Ocean Summit à Brest en 2022, la COP15 biodiversité en 2022 avec l'adoption d'un cadre mondial visant à créer un réseau mondial d'aires marines protégées (AMP) couvrant 30 % de l'océan d'ici à 2030 et l'adoption d'un traité historique sur la conservation et l'utilisation durable de la biodiversité marine en haute mer (BBNJ) en 2023. La Conférence des Nations Unies sur l'Océan (UNOC) en 2025 à Nice sera un évènement politique majeur pour soutenir la mise en œuvre de l'Objectif de Développement Durable 14 : Conserver et utiliser durablement les océans, les mers et les ressources marines pour le développement durable.

1. BILAN ET AVANCÉES DEPUIS LA PROSPECTIVE 2019

Les recherches présentées dans le bilan se déclinent autour de cinq thèmes prioritaires (climat, côtier et littoral, fines échelles, biogéochimie et écologie marine, et zones polaires), en tirant profit d'outils transverses (océanographie opérationnelle et intelligence artificielle).

1.1. LE CLIMAT

La communauté scientifique française a apporté des contributions de tout premier plan sur le suivi du niveau moyen des mers et du déséquilibre énergétique de la planète, par l'analyse et l'interprétation des données altimétriques combinées aux données gravimétriques et in-situ.

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 mis en évidence une accélération nette ($\sim 0,08$ mm/an²) de la montée du niveau moyen des mers qui atteint maintenant plus de 4 mm/an.

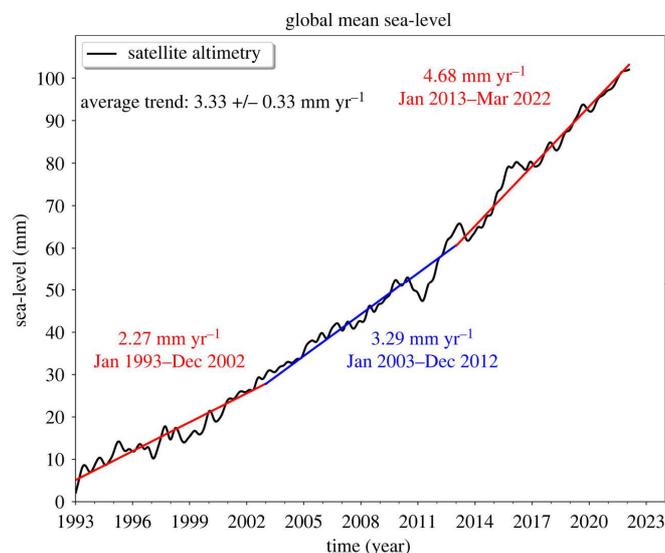


Fig. 1. Evolution du niveau moyen des mers de 1993 à 2022 (Cazenave et Moreira, 2022).

Combinées aux données Argo 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. La fermeture du bilan depuis 1993 montre que l'accélération observée dans la hausse du niveau de la mer s'explique essentiellement par une accélération de la perte de masse des calottes Antarctiques et Groenlandaises. L'accélération de l'augmentation du contenu en chaleur de l'océan joue aussi un rôle mais dans une moindre mesure.

1.2. LE CÔTIER ET LE LITTORAL

Il est essentiel d'évaluer, comprendre et anticiper la vulnérabilité des systèmes côtiers, en particulier dans le contexte du changement climatique. Les données satellitaires sont un outil essentiel pour une approche à la fois locale mais également globale.

La variabilité spatio-temporelle des paramètres biogéochimiques autour des côtes françaises a bénéficié d'un projet fédérateur qui a permis d'évaluer différents algorithmes de corrections atmosphériques et bio-optiques à partir des données de couleur de l'océan **Sentinel-2** et **-3**, en synergie avec les services d'observation in situ. Les produits générés permettent d'observer la zone côtière à moyenne (300m) et haute résolution (10m), par ex. pour surveillance de la qualité des eaux.

La bathymétrie, la topographie en zones intertidales et l'évolution du trait de côte sont des paramètres clés de l'étude des environnements côtiers. Des avancées majeures ont été réalisées

sur leur estimation et sur le suivi quasi-opérationnel du trait de côte à partir des images **Sentinel-1**, **-2**, **Venus**, **Pléiades** et **Landsat**. Les positions du trait de côte entre 1993 et 2019 combinées au niveau de la mer altimétrique et à des modèles numériques globaux ont permis de révéler que les littoraux sont impactés par trois principaux facteurs eux-mêmes liés à El Niño: le niveau de la mer, les vagues océaniques et les rivières (Fig. 2).

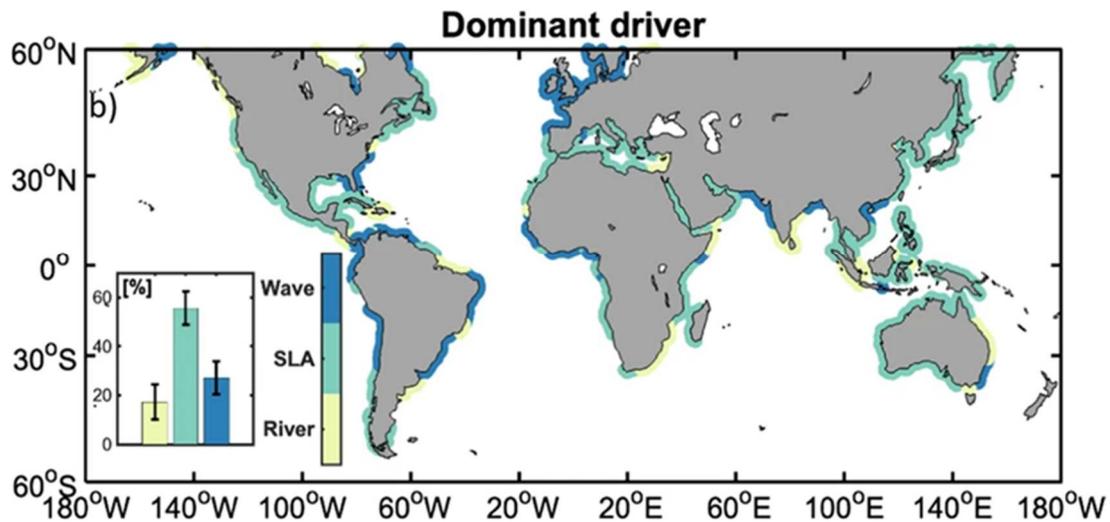


Fig. 2. Relation entre variation (1993-2019) du trait de côte et les facteurs hydrodynamiques (niveau de la mer, les vagues océaniques et les rivières) (Almar et al. 2023).

L'observation des propriétés des vagues et des vents forts est critique pour vérifier ou contraindre les modèles de submersion en cas de tempête ou cyclone, qui est un des risques majeurs pour les populations vivant dans les zones littorales. La mission **Cfosat** a permis de mesurer le spectre des vagues dans des longueurs d'onde inaccessibles aux mesures SAR ($\sim < 200\text{m}$), améliorant la description du couplage vent-vagues notamment dans les cyclones et à l'approche de la glace. Les observations **Smos** ont permis la mise en évidence d'un renforcement des forts cyclones lors de leur passage au-dessus de zones dessalées (e.g. panaches de fleuves), lié à des rétroactions océan-atmosphère.

Les mesures de hauteur de mer à la côte ont été raffinées par un retraitement adapté des formes d'onde côtières des mesures à haute résolution (300 m) des missions **Jason-1**, **-2**, **-3**. Ce retraitement a permis d'analyser les variations à moins de 8 km de la côte par rapport à celles du large sur les 20 dernières années.

En préparation à l'exploitation des données **Swot** dans les estuaires et zones littorales, des simulations numériques de l'hydrodynamique (avec ou sans assimilation) et l'instrumentation de zones littorales pour la phase de Cal/Val (côtes Normandes en France) ont été mises au point.

1.3. LES FINES ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES

On parle de fines échelles océaniques pour des structures telles que tourbillons et filaments de méso- et sous-méso-échelle et ondes internes avec des tailles typiques de 1-100 km. Pour ces études, la donnée spatiale reste la seule observation à la fois globale et à haute résolution.

Ce régime joue un rôle primordial dans le transport d'énergie et de matière ainsi que dans la modulation des processus biogéochimiques et écologiques, comme montré en combinant salinités de surface **Smos**, Chlorophylle-a (Chl-a) et courants géostrophiques dérivés des mesures altimétriques (Fig. 3).

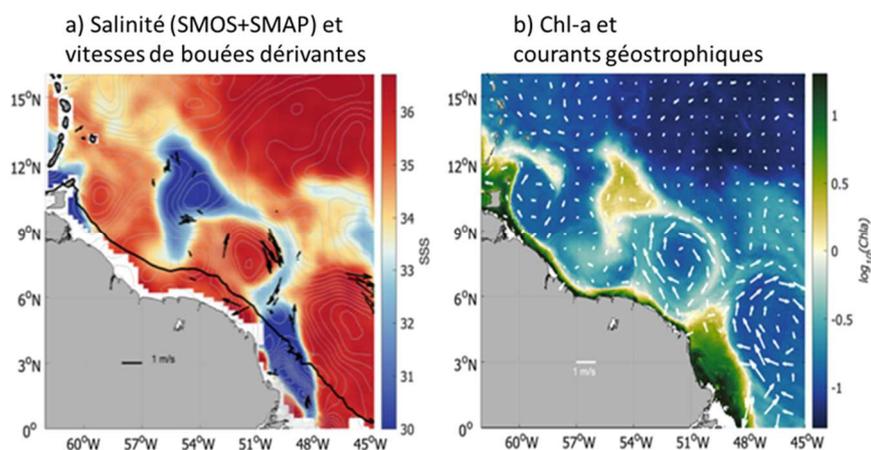


Fig. 3. Evolution d'un patch d'eau douce enrichi en chlorophylle se détachant du panache de l'Amazone au large de la Guyane (Olivier et al., 2024).

Afin de mieux comprendre la nature des signaux qui seraient observés dans la gamme méso- et sous-méso-échelle, des études préparatoires à la mission **Swot** ont porté sur la marée interne et ses interactions avec la circulation océanique. Elles ont permis de mettre au point des simulations réalistes à haute résolution forcées par la marée à l'échelle régionale, du bassin et globale.

En 2023, plus de vingt campagnes océanographiques se sont coordonnées autour du monde dans le cadre de la Cal/Val **Swot** (<https://www.swot-adac.org>). Cette ambitieuse initiative multisites, coordonnée par les équipes françaises et fortement soutenue par le Cnes, montre bien l'effet levier de telles actions pour fédérer des programmes internationaux d'envergure. Les premières observations **Swot** montrent un potentiel exceptionnel pour l'étude des fines échelles, avec une amélioration de la résolution spatiale par un facteur 10 (Fig. 4).

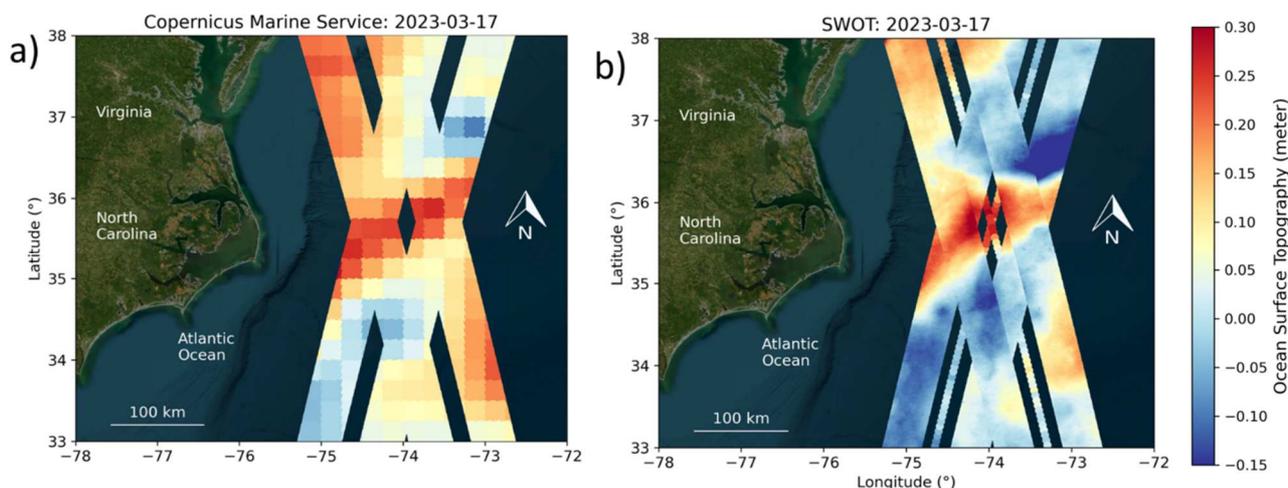


Fig. 4. Comparaison entre l'anomalie de hauteur de la mer détectée à partir de mesures a) altimétriques nadir 1D (produit 0,25° du Copernicus Marine Service, basé sur 7 satellites altimètres nadir) et b) 2D Swot. Ce dernier détecte beaucoup mieux les fines échelles. (Dibarbouré, 2024)

1.4. LA BIOGÉOCHIMIE ET L'ÉCOLOGIE MARINE

La compréhension de la biogéochimie, de l'écologie marine, et de leur couplage avec la physique de l'océan, du global au côtier, notamment au niveau du cycle du carbone a été un des axes prioritaires de recherche.

De longues (> 20 ans) séries continues d'observations satellitaires de Chl-a ont permis de déconvoluer la variabilité de la biomasse du phytoplancton sur des échelles spatiales ou temporelles

inédites. Derrière la variabilité saisonnière (associée au bloom de phytoplancton) la variabilité de la Chl-a à l'échelle globale apparaît davantage dominée par des fluctuations à haute fréquence (<3 mois) et petites échelles spatiales (<50 km) que par des fluctuations basse-fréquence, ce qui était le paradigme dominant jusqu'alors. Des efflorescences de phytoplancton plus précoces (une à deux semaines) et deux à trois fois plus intenses ont été mises en évidence dans les zones frontales.

La quantification du carbone organique dissous (DOC) de surface, plus grand réservoir de carbone organique dans l'océan, a été améliorée par la prise en compte, avec un réseau neuronal artificiel (ANN), de l'historique de paramètres physiques de la couche de surface, ce qui a permis de mieux estimer les différents compartiments du carbone organique (Fig. 5).

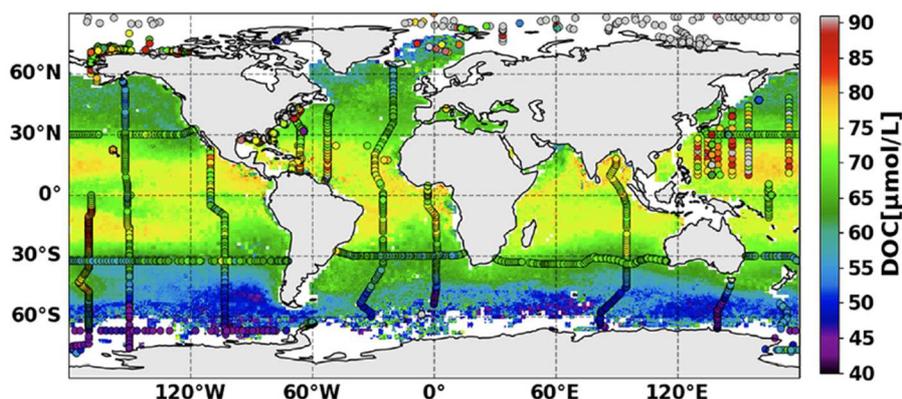


Fig. 5. Distribution du Carbone Organique dissous à la surface de l'Océan (Bonelli et al., 2022). Les cercles représentent les observations in situ

1.5. LES ZONES POLAIRES

Les zones polaires subissent des changements majeurs bien plus rapides que l'océan global (phénomène d'amplification polaire). Alors que la disparition de la banquise arctique estivale semble maintenant inéluctable, la banquise antarctique connaît à son tour une déstabilisation soudaine avec de probables conséquences majeures sur la stabilité de la calotte glaciaire et le niveau de la mer.

Les principaux résultats concernent le suivi de l'épaisseur de la banquise et de la neige. Ce n'est qu'avec l'arrivée de l'altimétrie Synthetic Aperture Radar (SAR) avec **CryoSat-2 (CS2)** que des mesures fiables d'épaisseur de glace ont pu être réalisées. Avec une technique d'intelligence artificielle (IA), il a été possible de reconstituer une série homogène sur 30 ans du volume des banquises Arctique et Antarctique (Fig. 6) en étalonnant successivement **Envisat, ERS-2 et ERS-1** sur **CS2**. Les séries d'épaisseur de neige sur la banquise ont également pu être étendues par bi-fréquence altimétrique (**CS2/Ku** et **Saral/Ka**) à l'Antarctique et des techniques combinant **CS2** et **IceSat-2** sont actuellement en développement.

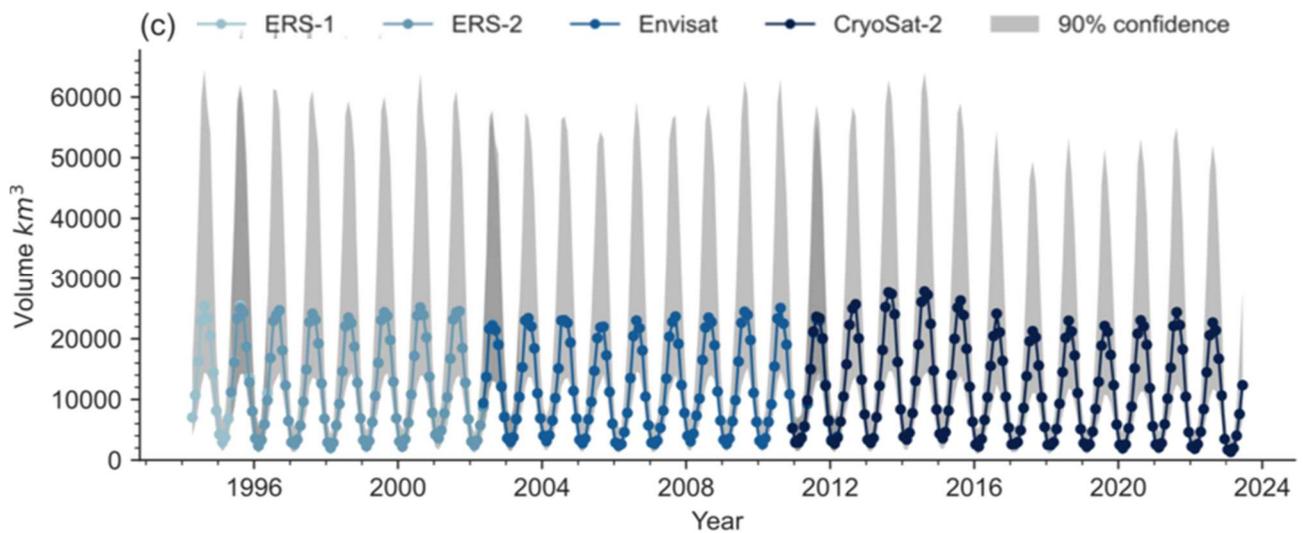


Fig. 6. Première observation spatiale sur 30 ans des variations de volume de la banquise Australe (Bocquet et al. 2024).

Les salinités mesurées par **Smos** ont mis en évidence des cellules d'eau douce issues de la fonte de la glace et de panaches de fleuve en océan Arctique, avec de très forts contrastes interannuels sur plus de 10 ans, en relation avec les courants de surface et les vents.

L'observation de la couleur de l'océan a permis de mieux cerner l'évolution des flux biogéochimiques dans l'océan Arctique. L'augmentation du débit des grands fleuves arctiques et la fonte du permafrost ont ensemble conduit à une augmentation du flux de carbone organique terrestre vers l'océan Arctique.

1.6. L'OCÉANOGRAPHIE OPÉRATIONNELLE

Les systèmes de réanalyse, d'analyse et de prévision océanique permettent aujourd'hui de représenter et de prévoir l'évolution de l'état de l'océan 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 systèmes d'analyse et de prévision mis en place et opérés aujourd'hui permettent d'assimiler une grande variété de données spatiales (niveau de la mer, température de surface, salinité de surface, hauteur significative des vagues, spectres de vagues, concentration, épaisseur et vitesses de déplacement de la glace, couleur de l'océan) aux échelles globales, régionales et côtières.

1.7. L'INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Des méthodes d'IA, mises en place à partir de données satellitaires (e.g. topographie de surface, couleur de l'océan) 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 (interpolation spatio-temporelle, downscaling, débruitage, fusion données multi-sources, segmentation et classification de structures géophysiques).

Des méthodes d'apprentissage profond ont ainsi été utilisées afin de fusionner des images satellitaires ayant des bandes spectrales et des résolutions spatiales différentes, notamment **Sentinel-2** et **-3** et pour l'étude des zones côtières à partir de données satellitaires de la couleur de l'océan.

1.8. ALGORITHMIQUE, EXPLOITATION ET PÔLES DE DONNÉES

Soutien des équipes algorithmiques et support aux Science Team internationales. La communauté s'est organisée autour de groupes mission fortement soutenus par le TOSCA. Ils sont fondamentaux pour coordonner les activités océan au niveau national, avec une ouverture forte de ces groupes à l'international via notamment des appels à proposition dédiés, permettant de renforcer le rayonnement de la communauté française.

Exploitation des données. Le retraitement des longues séries de données multi-capteurs, la qualification des incertitudes et l'exploitation scientifique de ces séries temporelles est une composante essentielle des études sur le climat. Ces travaux sont organisés via le programme Esa Climate Space auquel le CNES participe activement en mobilisant la communauté scientifique nationale qui est leader dans les domaines clés que sont l'étude du niveau de la mer, l'état de la mer et la salinité de surface. Le Cnes a joué et doit continuer de jouer un rôle majeur en amont de ces actions pour assurer un retraitement continu et à l'état de l'art des données.

Pôle de données. Une évolution majeure du paysage des plateformes numériques pour le spatial et les services a vu le jour. Au niveau national, l'IR Data Terra et ses quatre pôles, dont ODATIS pour l'océan et le domaine côtier, se sont structurés, des centres d'expertises ont été créés.

1.9. RETOURS SUR LES PRIORITÉS 2019 DE MISSIONS SPATIALES

Les missions **Cimr** et **Cristal** proposées dans le cadre du programme Copernicus Sentinel Expansion étaient des priorités fortes (P0) afin d'assurer une continuité (et des améliorations) des mesures micro-ondes de température, de salinité, et d'épaisseur de glace de mer 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 'Mission Advisory Groups' (MAGs) et à des activités préparatoires soutenues par l'Esa et le Cnes.

Le développement de l'altimétrie à fauchée est une révolution en océanographie 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 (**Sentinel 3NG TOPO (S3NG-Topo)**). La communauté française s'est fortement engagée dans le MAG **S3NG-Topo** 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 du choix d'une constellation d'altimètre à fauchée pour **S3NG-Topo** (post 2032).

Le groupe avait soutenu en priorité P0 une mission courant de surface. Le concept **Skim**, qui a fait l'objet d'une phase 0 Cnes et d'une phase A Esa, n'a pas été retenu en phase finale Earth Explorer 9 (EE9) bien qu'ayant été très bien évalué. La proposition **Stream** soumise à Esa EE11, malgré une évaluation scientifique très favorable, n'a pas été retenue (budget hors limite). La proposition **Odysea**, qui reprend une bonne partie du concept radar de **Stream**, a été soumise à l'appel Explorer de la Nasa en 2023 et acceptée pour une phase A.

Le groupe avait mis en priorité forte P0 le développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan (**Geo-Ocapi**, phase A terminée au CNES en 2016) couvrant au moins l'Europe mais aucun cadre programmatique n'a été identifié.

Des priorités P1 avaient été mises sur **Smos-hr**, **Trishna**, **Marvel**:

- **Smos-hr** a fait l'objet d'une étude de Phase A étendue entre 2020 et 2022. Une réponse à Esa EE12 a été soumise en 2023, avec un concept (**Fresch**) inspiré des études **Smos-hr** visant une salinité à résolution de ~10 km, a été bien évaluée mais n'a finalement pas été retenue ;
- Une composante océan de **Trishna** s'est structurée dans le cadre du TOSCA afin de définir et optimiser des algorithmes de température côtières et des données de référence pour la cal/val ;

- Le groupe mission **Marvel** s'est reconfiguré fin 2020 et contribue à la prochaine mission de gravimétrie du champ variable Nasa/Esa **Magic** (Mass-Change and Geosciences International Constellation).

1.10. ACCOMPAGNEMENT DE LA RECHERCHE SPATIALE

Le Cnes a continué de bien soutenir via le TOSCA les équipes françaises. Cet accompagnement 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 car certaines compétences clés dans les laboratoires reposent souvent sur quelques individualités.

2. LES QUESTIONS ET DÉFIS EN OCÉANOGRAPHIE

S'appuyant sur les différentes prospectives scientifiques nationales et internationales sur l'océan et le climat et sur le bilan et les avancées depuis la dernière prospective (voir section 1), les questions scientifiques et sociétales suivantes ont été identifiées:

2.1. COUPLAGES VENTS-COURANTS-VAGUES (ENJEU O.1)

Alors que les conditions météorologiques extrêmes devraient s'intensifier à l'avenir, la façon dont s'opèrent les couplages dynamiques à l'interface océan-atmosphère demeurent mal connus, car mal contraints par les observations existantes. Les interactions entre les courants, les vents et les vagues modifient les flux de chaleur et de CO₂ entre l'océan et l'atmosphère, orientent les tempêtes, déplacent les positions des principaux courants, influencent les cycles de l'oscillation australe El Niño, les vagues de chaleur marines et l'évolution rapide des zones marginales de glace. Cependant, en l'absence de mesures de courants de surface, les détails de ces couplages nous échappent encore, et des controverses de longue date sur la physique sous-jacente demeurent non résolues.

2.2. SALINITE A FINE ECHELLE LIÉE AUX APPORTS D'EAU DOUCE ET RETROACTIONS (ENJEU O.2)

Les plateaux continentaux et les zones en bord de glace sont soumis à de fortes variations de salinité, via les apports d'eau douce par les fleuves ou la fonte des glaces. Les zones polaires subissent des changements bien plus rapides que l'océan global, avec des rétroactions sur le climat de l'ensemble de la planète. Mais de nombreuses inconnues subsistent : où, quand, par quels mécanismes les flux d'eau douce pénètrent-ils dans l'océan ? Comment influencent-ils la stratification des couches de surface de l'océan, et comment les forts gradients de densité qu'ils induisent participent-ils à la circulation côtière et polaire ? Comment l'export des eaux peu salées vers le large par la dynamique tourbillonnaire structure-t-elle la distribution des salinités à méso échelle, avec des conséquences sur les échanges océan-atmosphère de chaleur, d'énergie et de gaz et sur la circulation océanique.

2.3. CONTINUUM TERRE-OCEAN (ENJEU O.3)

Les régions côtières subissent l'influence des changements de l'océan global et des apports continentaux fortement anthropisés avec des conséquences sur les écosystèmes diversifiés qu'elles abritent. Quels sont les flux terre-mer (eau, matière, chimie), leurs interactions avec la dynamique côtière et l'océan ouvert, et comment répondre aux enjeux de l'adaptation et de la gestion des risques dans les zones côtières ? Suivre et prévoir leur évolution nécessite de mieux comprendre leur dynamique, les interactions entre les processus physiques, la biogéochimie, les sédiments et la distribution des polluants, mais aussi une continuité d'observations depuis les bassins versants jusqu'à l'océan côtier (de la côte au talus) et l'océan profond. L'approche considérant ainsi le continuum continent-océan est mieux à même d'estimer les variations de volume d'eau, les flux et les différentes composantes de la circulation ainsi que leur variabilité spatiale et temporelle.

2.4. EVOLUTION DE LA POMPE BIOLOGIQUE DE CARBONE ET DE LA BIODIVERSITÉ MARINE (ENJEU O.4)

Améliorer l'observation de la biogéochimie marine, du global au côtier, est nécessaire notamment pour mieux comprendre l'évolution du cycle du carbone, de la production primaire, des échelons trophiques plus élevés et plus généralement de la biodiversité marine. Quel est le rôle des fines échelles océaniques sur la biologie ? Comment les changements des propriétés thermodynamiques, dynamiques et optiques de la banquise affectent-ils la biogéochimie, et in fine le réseau trophique marin ? Comment identifier et suivre les "hotspots" écologiques pour soutenir les politiques d'exploitation et conservation durables ? Identifier les régions les plus vulnérables aux perturbations anthropiques, surveiller l'évolution de la biologie dans les aires marines protégées relativement à d'autres régions, surveiller les changements qui auront des effets néfastes sur les écosystèmes marins, est nécessaire pour accompagner la définition des politiques d'exploitation et conservation durables, et pour estimer l'efficacité des mesures de protection mises en œuvre et les besoins futurs.

2.5. VARIABILITÉS, TENDANCES ET POINTS DE BASCULE DU SYSTÈME CLIMATIQUE (ENJEU O.5)

L'océan est en pleine mutation. Induira-t-il des points de bascule ou changements irréversibles de certaines variables climatiques susceptibles de modifier le rôle de l'océan vis à vis de l'évolution du climat, ou l'occurrence d'évènements extrêmes ? Quels sont les processus sous-jacents et comment détecter les risques de franchissements de points de bascule, les anticiper, fournir des éléments à la société pour mieux s'y préparer ? Répondre à cet enjeu requiert de comprendre les voies menant aux points de bascule, de maintenir et optimiser des séries d'observations longues de variables climatiques essentielles.

2.6 AMÉLIORER LES ANALYSES ET PRÉVISIONS DE L'OCÉAN, ACCOMPAGNER LE DÉVELOPPEMENT DES JUMENTS NUMÉRIQUES (ENJEU O.6)

La multiplication des observations spatiales, les mesures in situ qui fournissent des informations complémentaires cruciales (e.g. sous la couche de surface), mais sont fortement sous-échantillonnées, rend indispensable leur synthèse via des modèles numériques, qu'il est important de faire évoluer, et des techniques d'IA, de jumeaux numériques, de plus en plus performants. Le maintien d'observations systématiques régulières est également un besoin pour les services océaniques (Copernicus Marine Service).

3. RECOMMANDATIONS DU GROUPE

Les missions d'océanographie spatiale relevant de cette prospective seront menées dans le cadre de coopérations bilatérales entre le Cnes et des agences internationales, et des programmes Copernicus de l'Union Européenne et Earth Explorer de l'Esa. Les priorités de la communauté océan ont été définies selon une analyse du paysage et des manques vis à vis des priorités scientifiques (section 2). Elles concernent les missions en préparation.

3.1. MISSIONS SPATIALES : CADRE BILATÉRAL OU A DÉFINIR

3.1.1. ODYSEA

Odysea vise à mesurer, pour la première fois depuis l'espace, le courant océanique de surface total sur l'océan global (enjeu O.1). C'est **la priorité majeure**. Le concept proposé est un radar Doppler en bande Ka à très forte incidence (55°), de façon à limiter la perturbation des mesures par les vagues, avec une très large fauchée couvrant 86% de l'océan global chaque jour, permettant une précision sur la mesure de courant de 40 cm/s dans des pixels de 2.5 km. **Odysea** est en phase A au CNES, et la réponse au call 'Explorer' de la NASA a été sélectionnée en mai 2024 pour une phase A compétitive (4 missions sélectionnées ; 2 missions choisies courant été 2025 ; lancements 2030-2032). **Odysea** est complémentaire à la mission **Harmony** (Esa EE10, sélectionnée) qui

devrait caractériser les courants à plus haute résolution spatiale mais sans couverture globale et avec des revisites bien moins fréquentes (~10 jours).

3.1.2. SMOS-HR

L'autre **priorité majeure** est la mesure de la salinité sur l'océan global à ~10 km de résolution (Enjeu O.2). Avec une résolution de ~10 km, **Smos-hr** permettrait d'observer environ 90 % de la surface des plateaux continentaux (contre environ 50 % avec **Smos/Smop**) et les structures tourbillonnaires jusqu'à 60° de latitude. **Smos-hr** portera un interféromètre radiométrique en bande L avec un réseau d'antennes optimisé pour la haute résolution. Avec une revisite tous les 1 à 3 jours selon la latitude, la précision sur des salinités hebdomadaires à 15 km de résolution serait inférieure à 0.2 g/kg (précision actuellement atteinte sur des salinités hebdomadaires à 50 km de résolution). Une phase A a été menée au Cnes avec succès, mais un cadre programmatique reste à trouver.

3.1.3. SWOT-LAND OCEANIC AQUATIC CONTINUUM (LOAC)

La mission **Swot-loac** vise à estimer les flux d'eau et de ses constituants en réalisant simultanément des mesures de hauteur, courants totaux et vagues à très haute résolution (O(100 m)) sur l'ensemble du continuum continent-océan (Enjeu O.4). Compléter les mesures d'élévation, telles qu'elles peuvent être déduites avec **Swot**, avec des mesures de vitesse de courants totaux fournirait toutes les composantes dynamiques des courants et une information concomitante sur les volumes et courants, donc sur les flux. Une forte revisite temporelle sera rendue possible sur la topographie en optimisant les paramètres de la mission (très large fauchée, orbite) de manière coordonnée avec les missions **S3NG-Topo** et **S6-NG**. C'est une **priorité substantielle**, en discussion avec la **Nasa**.

3.1.4. LIDAR MARIN PROFILEUR

Des mesures de la couleur de l'eau par Lidar marin profileur permettraient d'inventorier la variabilité de paramètres bio-optiques et biogéochimiques sur les premières dizaines de mètres (Enjeu O.4), de jour comme de nuit, et aux hautes latitudes (pendant les hivers polaires) au contraire des mesures couleur de l'eau par capteurs multi-spectraux passifs. Les observations spatiales de couleur de l'eau LIDAR ont été démontrées, notamment par la missions **Calipso** (Cnes/Nasa). L'ajout d'une bande de fréquence dans le bleu (470-480 nm) aux lidars spatiaux permettrait d'accéder à de plus grandes profondeurs dans les eaux du large. La mission **Caligola** (Asi, IT) en formation avec **AOS** (en cours de développement, Nasa avec contribution Cnes), pourrait fournir des profils verticaux dans l'océan. Le groupe recommande de veiller à ce que les caractéristiques de cette mission satisfassent les besoins pour l'observation marine. C'est une **priorité substantielle**. A des fins de démonstration, le groupe recommande la réalisation d'un démonstrateur aéroporté ou sur bateau.

3.1.5. CFOSAT-NG

Poursuivre et améliorer les mesures des propriétés des vagues est nécessaire (Enjeu O.1). Un radar inspiré de la mission franco-chinoise **Cfosat**, avec une visée proche nadir, permettrait de mesurer outre le spectre des vagues et le vent, une mesure du courant total de surface mais sur une fauchée de ~500 km. C'est une **priorité substantielle**. Le cadre programmatique pour **Cfosat-NG** reste à trouver.

3.1.6. GALENE

La proposition **Galene** vise à réaliser des mesures caractérisant les écosystèmes aquatiques côtiers, la pollution aquatique (e.g. plastiques, nappes de pétrole) et les fonds marins (enjeux O.3 et O.4), avec une synergie de trois capteurs : un capteur hyperspectral, une caméra panchromatique, un polarimètre multi-angulaire multispectral. Elle constitue un volet océanique complémentaire à la mission **Biodiversity** et son capteur hyperspectral dont les caractéristiques (résolution spectrale, rapport signal à bruit) sont moins adaptées au milieu aquatique. Il s'agit d'une proposition intéressante mais, au vu des autres missions couleur de l'eau côtières déjà acceptées au niveau international, e.g. **Chime**, **S3** et **S2-NG** et la priorité du groupe pour une mission couleur de l'océan géostationnaire, c'est une **priorité mineure**.

3.2. MISSIONS SPATIALES : CADRE EUROPEEN

Nous exposons ci-après des missions en cours de développement, qui répondent à des besoins exprimés par la communauté nationale, et qu'il est important de soutenir.

3.2.1. MISSIONS COPERNICUS

Assurer une continuité des mesures des variables climatiques et océaniques essentielles est une **priorité majeure** (enjeu O.5). Les missions Sentinel (**S1, S2, S3 et S6**) assurent en partie la surveillance régulière de ces variables et continueront sur la prochaine décennie. Les missions des futurs programmes Sentinel Expansion (**Cimr, Cristal, Chime, Lstm**) puis Sentinel NG viendront grandement les compléter et les améliorer. La détection des différents types fonctionnels de phytoplancton, sera notamment améliorée avec l'utilisation d'instruments couleur de l'eau hyperspectraux. Le développement de l'altimétrie à large fauchée sur la mission **S3-NG-Topo** pour observer l'océan global est une **priorité majeure** et nécessite une implication forte du Cnes pour assurer l'héritage **Swot**.

3.2.2. COULEUR DE L'EAU GÉOSTATIONNAIRE.

La réalisation d'une mission géostationnaire couleur de l'océan sur l'Europe, telle que **Geo-Ocapi** en priorité forte lors des précédentes prospectives, reste une **recommandation majeure**. Elle permettrait d'observer et mieux comprendre des phénomènes à évolution rapide liés, en particulier, à la dynamique côtière ainsi que l'étude du fonctionnement à petite échelle temporelle de l'écosystème (Enjeux O.3 et O.4). Une part de plus en plus grande de l'océan sera couverte par des missions géostationnaires, avec les missions **Goci-1 et 2**, et les missions américaines **Glimr** (Nasa, lancement 2026) et **Geoxo** (Noaa, post 2032), mais les côtes européennes resteront non couvertes. Une insertion sur les futures plates-formes Meteosat (4^{ème} génération) doit être poussée.

3.2.3. CRYORAD

La mission radiométrique **Cryorad** propose de combiner une gamme étendue de fréquences (0.5-2GHz) pour mesurer la salinité dans les eaux très froides (enjeu O.2) où la sensibilité de la mesure à 1.4GHz à la salinité diminue. Cette alternative potentiellement intéressante mais très exploratoire n'a pas encore été testée, et a motivé une implication de la communauté océan française dans la proposition **Cryorad**, coordonnée par l'IFAC (Italie), acceptée en phase 0 à Esa EE12.

3.2.4. MAGIC, GENESIS ET DORIS NEO

Le groupe TOSCA Océan soutient fortement les recommandations portées par le groupe TOSCA Terre Solide sur la mission Nasa/Esa **Magic** pour la mesure du champ de gravité terrestre et ses variations. Les performances attendues (améliorations d'un facteur 10 par rapport à **Grace** et **Grace Fo**) auront des impacts majeurs pour les études sur les échanges de masses d'eau, le niveau de la mer, le bilan énergétique de planète. Le groupe soutient également l'amélioration du système de référence terrestre (mission Esa Future Navigation **Genesis**) et du système de positionnement (**Doris Neo**) pour optimiser la précision des mesures altimétriques.

3.3. ALGORITHMIQUE, EXPLOITATION ET PÔLES DE DONNÉES

Soutien des équipes algorithmiques et support aux Science Team internationales. Du fait de la proximité des thématiques, il serait souhaitable à l'avenir de rapprocher les équipes scientifiques Swot océan et OSTST (Ocean Surface Topography Science Team).

Exploitation des données. Le retraitement de données existantes et le développement de nouvelles approches d'inversion sont essentiels afin d'améliorer les précisions ou développer de nouvelles observables. Dans un contexte où le volume des données et le nombre d'observables augmentent, les méthodes d'IA sont appelées à prendre de plus en plus d'importance tant pour optimiser les traitements et analyses de données, que pour les combiner à l'information fournie par la modélisation, soit par assimilation de données, soit via l'utilisation de jumeaux numériques.

Pôle de données. Les centres d'expertises concentrent un savoir-faire national dans un domaine particulier (ex. sur la couleur de l'eau). Il est nécessaire de les accompagner pour une meilleure intégration dans le paysage national de la recherche.

3.4. COMPLEMENTARITE OBSERVATIONS IN-SITU ET SATELLITAIRES

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 et au niveau international. 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 va permettre de traiter ces questions de façon coordonnée.

3.5. ACCOMPAGNEMENT DE LA RECHERCHE SPATIALE

En regard du nombre de missions actuelles ou futures (Cnes ou bilatéral, Copernicus, Esa, 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, notamment en postes 'statutaires' (chercheurs, ingénieurs) dans les laboratoires.

4. CONCLUSION

Les priorités sont résumées ci-après pour les **coopérations bi-latérales**:

Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement	Priorité	Recommandation
O.1	Courants et vents globaux	Odysea	Majeure	phase A1 CNES en cours (jusqu'à juillet 2025) "Kick off" phase A NASA Juin 2024 Bilatéral CNES-NASA à soutenir
O.2	Salinité haute résolution	Smos-hr	Majeure	Phase A CNES réalisée- Cadre bilatéral à trouver
O.3	Topographie, courants, vagues, continuum terre-mer	Swot loac	Substantielle	En discussion CNES NASA
O.4	Profils verticaux couleur de l'eau (particules, chl-a) de jour, de nuit et durant l'hiver polaire	Lidar marin profileur (Caligola / AOS)	Substantielle	Veiller à un concept instrumental adapté aux mesures marines
O.1	Vagues, Courants, vents	Cfosat-NG	Substantielle	Cadre bilatéral à trouver
O.3 et O.4	écosystèmes aquatiques côtiers, pollution aquatique, et fonds marins	Galene	Mineure	Cadre bilatéral à trouver

Les recommandations pour les missions menées dans un **cadre européen** avec une participation nationale importante sont résumées ci-après:

Questions scientifiques	Observable	Cadre actuel de développement	Priorité	Recommandation
O.5	Niveau de la mer Large fauchée	S3NG Topo	Majeure	Accompagnement du Cnes nécessaire pour sécuriser les développements et valoriser les avancées Swot
O.3 et O.4	Couleur de l'eau géostationnaire	Geo-Ocapi (phase A Cnes terminée)	Majeure	A recommander sur futurs Meteosat
O.5	Champs de gravité terrestre	Esa/Nasa Magic (phase B1 ESA)	Majeure	A soutenir pour passage phase C/D
O.5	Positionnement	Genesis et Doris Neo	Majeure	Essentiel pour précision altimétrique
O.2 et O.5	Salinité en eaux froides	Cryorad phase 0 compétitive EE12	Substantielle	Fort potentiel pour les hautes latitudes

5. REFERENCES

- Almar, R. et al. (2023) Influence of El Niño on the variability of global shoreline position. Nat Commun14, 3133. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38742-9>.
- 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.
- 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.
- Cazenave A, Moreira L. (2022), Contemporary sea-level changes from global to local scales: a review. Proc. R. Soc. A478:20220049. <https://doi.org/10.1098/rspa.2022.0049>.
- Dibarboure et al. (2024) Blending 2D topography images from SWOT into the altimeter constellation with the Level-3 multi-mission DUACS system, EGUsphere [preprint], <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-1501>.
- Olivier et al. (2024), Late summer northwestward Amazon plume pathway under the action of the North Brazil Current rings, Remote Sensing of Environment, 307, 114165, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114165>.