

## **GROUPE DE TRAVAIL THEMATIQUE OCEAN**

Sévérine Alvain, Jean-Michel André, Marcel Babin (expert invité), Pascal Bonnefond, Jacqueline Boutin, Annick Bricaud, Francesco D'Ovidio, Yann Drillet, Alexei Kouraev, Pierre-Yves Le Traon (Président entrant), Marina Levy (Présidente sortant), Anne Lifermann (thématicienne), Hubert Loisel (expert invité), Bertrand Lubac, Benoit Meyssignac, Rosemary Morrow (experte invitée), Alexis Mouche (expert invité), Thierry Penduff, Annick Sylvestre-Baron (thématicienne)

### **1. Introduction – les grandes questions et défis**

#### **1.1. L'observation des océans : un besoin pressant affirmé aux plus hauts niveaux**

L'océan joue un rôle de premier plan vis-à-vis de l'évolution du climat. Plus de 90% de l'excès de chaleur reçu par la planète en raison du réchauffement climatique et un tiers des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> sont absorbés par l'océan. Plus de 75% des flux évaporation-précipitation ont lieu au-dessus de l'océan. L'océan est aussi une source essentielle de nourriture, d'énergie et contribue au développement de l'économie mondiale. 90% des transports de marchandises se fait par les océans. La pêche et l'aquaculture fournissent plus de 20% de la ration protéique moyenne de trois milliards de personnes. Les énergies marines renouvelables offrent un potentiel considérable pour l'organisation de la transition énergétique.

Les océans subissent cependant des pressions majeures en raison du changement climatique et d'autres activités humaines (e.g. pollution, surpêche, extraction minière). Une gestion durable de l'océan et de ses ressources visant à préserver l'état de santé des océans tout en contribuant au développement de l'économie bleue est devenue impérative. Celle-ci doit s'appuyer sur l'observation continue et sur le long terme de l'ensemble des océans permettant de comprendre, décrire et prévoir l'évolution de ses propriétés physiques et biogéochimiques, caractériser l'impact du changement climatique sur les océans et appuyer les politiques visant à réduire les effets climatiques et à s'y adapter.

Le besoin d'observation des océans est affirmé aux plus hauts niveaux politiques: agenda 2030 et Decade of Ocean Science des Nations Unies pour le développement durable (Objectifs de Développement Durable/ODD dont l'ODD 14 dédié à l'océan), préparation par le GIEC d'un rapport spécial sur "Climate Change, the Oceans and Cryosphere", Tsukuba Communiqué du G7 sur l'observation des océans, rapport de l'OCDE "The Future of Ocean Economy in 2030" et conférence internationale OceanObs19 sur l'observation des océans.

#### **1.2. Apport de l'observation spatiale**

Une des caractéristiques essentielles du système d'observation des océans est l'intégration des moyens d'observations : utilisation conjointe et complémentarité des observations spatiales et in-situ, rôle de la modélisation et de l'assimilation de données pour interpoler de façon dynamique les observations et effectuer des prévisions. Le système est aussi conçu pour répondre à des besoins variés (recherche, climat, santé de l'océan, services océaniques).

Les satellites jouent un rôle majeur dans ce système intégré. Ils permettent d'accéder à des observations de paramètres clés pour la compréhension, le suivi et la prévision des océans : niveau de la mer et courants géostrophiques, température et salinité de surface de la mer, biogéochimie marine via la couleur de l'océan, vagues, vents. Les satellites apportent une couverture unique globale à haute résolution (spatiale et temporelle) et long terme. Les mesures des satellites doivent être complétées par des mesures in-situ permettant d'étalonner et valider les observations des satellites, d'apporter la dimension verticale (observation de l'intérieur de l'océan) et de donner un contexte historique à long terme.

#### **1.3. Un rôle accru de l'Union Européenne avec Copernicus**

Le CNES a eu un rôle moteur en océanographie spatiale avec, en particulier, le développement de la filière d'excellence altimétrique. La mise en place du programme Européen Copernicus représente un changement

de paradigme pour l'observation de la Terre en Europe. Copernicus met en œuvre de nouvelles capacités opérationnelles de suivi du système Terre avec une vision à long terme (> 20 ans). Celles-ci s'appuient sur une composante spatiale (les missions Sentinel) remarquable et un ensemble de services dont le service marin (CMEMS) piloté par la France (Mercator Ocean). Dans ce nouveau contexte, le rôle du CNES évolue. Il doit être un acteur majeur dans la définition et la mise en œuvre de Copernicus, assurer une collaboration étroite avec l'ESA et Eumetsat et accompagner la participation des laboratoires français. Parallèlement, il doit continuer d'être une force de proposition et de développement pour des missions ou des concepts innovants pouvant être ou non intégrés à terme dans Copernicus.

#### 1.4. Les grandes questions et défis en océanographie

Les grandes tendances en océanographie pour la prochaine décennie et qui relèvent de cette prospective peuvent se décliner en cinq thèmes principaux:

1. **Le climat.** Il s'agit d'améliorer notre connaissance du rôle de l'océan sur le climat, de prédire l'évolution du climat, de suivre et prévoir l'évolution de l'océan pour analyser l'impact des mesures d'atténuation et mettre en œuvre des politiques d'adaptation adéquates. La recherche internationale sur le climat s'oriente aujourd'hui vers deux directions fortes : 1) l'observation, la compréhension et la prédiction/projection couplée du climat en analysant non plus les composantes du système comme l'océan, l'atmosphère, la cryosphère et les continents, mais en analysant les grands cycles climatiques qui couplent toutes les composantes (e.g. eau, énergie, carbone); 2) le développement d'une recherche qui soutient le développement de savoir utilisable par la société (climate services). Il est impératif dans cadre d'assurer une continuité des observations spatiales, une cohérence entre les différentes variables observées et d'associer des incertitudes fiables et validées aux mesures. Des observations toujours plus précises et résolues (en particulier dans les régions anthropisées comme le domaine côtier ou les zones clés qui sont source de risque comme les calottes polaires) sont également indispensables.
2. **Le côtier et le littoral.** La plupart des attentes sociétales vis-à-vis de l'océan se manifestent dans les zones côtières qui subissent des pressions majeures en raison des activités humaines. Mieux comprendre la dynamique des zones côtières (continuum terre-mer incluant le couplage avec les bassins versants) et les interactions entre la physique, la géochimie et la biologie, quantifier leur rôle sur le cycle du carbone, suivre et prévoir leur évolution sont des priorités fortes pour la prochaine décennie. Les observations spatiales permettront de compléter les rares mesures in situ disponibles sur les variables biogéochimiques (flux de substances particulières et dissoutes terrigènes colorées, pigments phytoplanctoniques). Elles permettent également de caractériser la bathymétrie et les habitats benthiques. L'incertitude sur la bathymétrie côtière est un verrou pour l'étude de la morphodynamique du littoral et des processus hydrodynamiques contrôlant la dynamique des plages et du trait de côte. Les habitats benthiques littoraux sont souvent négligés dans les bilans globaux de carbone, alors que ces écosystèmes sont de plus en plus reconnus comme étant aussi productifs que les forêts tropicales. Ils structurent l'ensemble des services écosystémiques rendus par les systèmes littoraux ainsi que les activités économiques associées, telle que la conchyliculture.
3. **Les fines échelles spatio-temporelles.** La mise en évidence du rôle essentiel de la mésoéchelle et de la sub-mésoéchelle sur la dynamique océanique et du couplage avec la biologie est une des avancées majeures des dernières années en océanographie. Elle va de pair avec le développement de modèles globaux/régionaux avec une résolution kilométrique et leur couplage avec des modèles côtiers. Les petites mésoéchelles sont actives dans la circulation horizontale et affectent le bilan d'énergie cinétique de l'océan; les fronts et les filaments sub-mésoéchelles jouent un rôle important dans les échanges verticaux des couches supérieures aux couches les plus profondes et ont un impact sur les échanges verticaux de chaleur, de carbone, de nutriments et donc sur la structure physique, biogéochimique et biologique de l'océan. La mission SWOT fournira à partir de 2021 des observations 2D sans précédent de la topographie de la surface de l'océan résolvant les longueurs d'onde de 15 à 40 km en fonction de l'état de la mer. À ces échelles, les interactions entre les mouvements en équilibre géostrophique (e.g. tourbillons méso-échelles, méandres et jets) et les mouvements haute fréquence non équilibrés (e.g. courants inertiels, ondes internes) jouent un rôle important dans la dynamique des courants océaniques et dans la définition des voies menant au mélange et à la dissipation dans l'océan. SWOT fournira une mine d'informations sur ces fines échelles en haute mer, mais également dans le continuum côtier-estuarien. SWOT est cependant une mission de démonstration et il est essentiel que les avancées technologiques et scientifiques réalisées grâce à SWOT se poursuivent sur le long terme.

- 4. La biogéochimie 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. L'effort d'observation de l'océan, via une synergie entre des plateformes in-situ autonomes (flotteurs profileurs, gliders, mouillages), classiques (navires océanographiques) et les satellites, est amené à se renforcer afin d'obtenir une vision en 3D/4D des processus biogéochimiques. Cette synergie est essentielle pour les études touchant l'écologie marine, pour laquelle l'intégration de données satellite et observations in situ, telles que l'acoustique et la télémétrie animale, permettra de caractériser la biogéographie hauturière. Cette information sera primordiale pour supporter les politiques de conservation (e.g. négociations intergouvernementales "Biodiversity Beyond National Jurisdictions") et d'exploitation de ressources marines en haute mer. En parallèle de ces études, les activités de recherche liées à l'interprétation du signal optique (propriétés optiques et radiométriques) devront être poursuivies. Les relations bio-optiques sont des relations empiriques qui connectent les mesures optiques aux variables biogéochimiques d'intérêt (e.g. couleur de l'eau et Chl-a ; coefficient de rétrodiffusion particulaire et stock de carbone organique particulaire POC). Il est indispensable de mieux contraindre ces relations, de déterminer leur représentativité à l'échelle globale et d'identifier plus précisément les régions pour lesquelles les relations globales sont inadéquates afin de développer des relations locales. La détection des tendances du changement climatique devient possible via différents indicateurs: la concentration en chlorophylle, mais aussi les PFT (Plankton Functional Types) et les mesures radiométriques (réflectances). Les algorithmes de détection et quantification des PFT s'appuieront de plus en plus sur les données satellitales hyperspectrales (e.g. PACE/OCI). La détection des tendances climatiques devra s'appuyer sur des séries de données multi-capteurs les plus homogènes possibles, selon des techniques de fusion qui restent à améliorer.
- 5. 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. Les grands défis scientifiques de l'océanographie propres aux zones polaires englacées (océans Arctique et Austral), auxquels les observations spatiales peuvent contribuer concernent principalement la banquise, les mers nordiques et les flux biogéochimiques. La banquise joue un rôle majeur dans les échanges océan-atmosphère, le mélange vertical et les flux biogéochimiques dans l'océan. Sa réponse actuellement observée au changement climatique reste mal comprise, à tel point que les modèles climatiques continuent de mal prédire l'évolution de son étendue en mode rétrospectif. Les mers nordiques sont le siège des échanges de masses d'eau entre l'Atlantique Nord et l'océan Arctique. La chaleur que ces premières contiennent et leur devenir en Arctique affectent l'évolution de la banquise et de la circulation à grande échelle. Les flux biogéochimiques sont fortement affectés par les changements des propriétés thermodynamiques, dynamiques et optiques de la banquise. La banquise constitue par ailleurs un obstacle significatif pour les flux océan-atmosphère de carbone dont l'ampleur pourrait changer significativement avec une réduction de l'étendue de la banquise Arctique, et entraîner une augmentation significative du pH. La banquise affecte aussi les flux de composés volatiles climatiquement actifs tels que le DMS. Finalement, la banquise contraint fortement la dynamique (phénologie) des blooms de phytoplancton, qui eux-mêmes façonnent la structure du réseau trophique marin.

Ces thèmes ne sont pas, bien entendu, indépendants. Les couplages avec les autres composantes du système Terre (atmosphère, cryosphère, surfaces continentales, terre solide) font notamment partie intégrante des questionnements de recherche de ces différents thèmes.

Un thème transverse concerne l'océanographie opérationnelle qui apporte une approche intégrée (observations satellites et in-situ, modélisation et assimilation de données, services) pour traiter du besoin de suivi et de prévision des océans. Les systèmes de réanalyse, d'analyse et de prévision océanique pour la physique permettent aujourd'hui de représenter et de prévoir l'évolution de l'océan global de la grande échelle jusqu'à la mésoéchelle. La tendance pour la prochaine décennie est de proposer des systèmes plus intégrés prenant en compte les interactions et rétroactions de la physique sur la biogéochimie et les couplages océan/vagues/glace de mer/atmosphère, des systèmes à plus haute résolution, permettant une représentation plus complète de la mésoéchelle à toutes les latitudes et des systèmes ensemblistes permettant de mieux représenter les incertitudes et les erreurs de prévisions. L'amélioration des systèmes pour la biogéochimie nécessitera des développements méthodologiques mais aussi l'amélioration des mesures satellitaires de

couleur de l'océan (e.g. géostationnaire) et le développement des systèmes d'observation in-situ (e.g. BioGeochemical Argo).

Les techniques d'intelligence artificielle pour l'analyse en masse de données (« big data mining », « machine learning ») vont enfin jouer un rôle de plus en plus important avec le développement de l'observation et de la modélisation à très haute résolution.

## 2. Bilan et avancées depuis la prospective 2014

### 2.1. Compréhension des processus océaniques

La combinaison d'observations multicapteurs et in situ, de simulations numériques, et l'assimilation de ces données dans les modèles, a permis d'affiner l'étude de la dynamique de mésoéchelle, de son rôle sur les transports de propriétés et ses interactions avec d'autres échelles. Par exemple, les observations satellites ont permis de calibrer des modèles globaux qui à leur tour ont permis de montrer que la mésoéchelle alimente et confère un caractère partiellement chaotique à la variabilité interannuelle à décennale grande échelle. Les données de l'altimétrie côtière, confrontées aux simulations numériques, permettent désormais de mieux comprendre la dynamique des fronts d'upwelling ou des courants de bord.

La préparation de la mission altimétrique à haute résolution SWOT a multiplié les études de modélisation initialement motivées par les imageries haute résolution de couleur et température, explorant le rôle de la submésoéchelle sur la cascade d'énergie océanique, sur les transports verticaux de chaleur et de nutriments, et sur la diversité du plancton. Ces modèles ont montré le couplage entre la dynamique géostrophique et les ondes internes en tant que mécanisme submésoéchelle important jusqu'ici largement négligé, et des méthodes ont été proposées pour séparer dans les observations ces deux contributions. Des stratégies d'échantillonnage in-situ adaptatives ont été développées pour tirer le meilleur parti des observations de télémétrie actuelles et futures.

L'observation spatiale de la salinité depuis 9 ans, combinée aux autres mesures satellitaires et in-situ (SST, couleur de l'eau, courants, pluie), a permis d'améliorer la compréhension du cycle de l'eau, de détecter des anomalies interannuelles de salinité reliées aux événements climatiques (El Niño, Indian Ocean Dipole), aux flux d'eau douce, notamment aux décharges de fleuves jusqu'au voisinage des côtes. Des études récentes ont montré que l'assimilation de la salinité satellitaire pourrait permettre d'améliorer la prévision des événements El Niño.

La préparation de la mission CFOSAT a motivé de gros efforts pour améliorer la caractérisation des relations entre vent, rugosité, vagues et courants de surface. Ces caractéristiques jouent un rôle prépondérant dans les échanges air-mer et sont particulièrement affectées par les événements extrêmes (e.g. cyclones) avec de possibles rétroactions.

L'amélioration des algorithmes couleur de l'océan a ouvert la voie à de nouvelles études, à la fois sur la structuration de la biodiversité, sur la quantification des stocks de carbone particulaire et dissous, et sur les liens entre apports atmosphériques et production biologique. La préparation de la mission OCAPI a motivé des études de la variabilité biologique sur des échelles de temps diurne et intra-saisonnière. Les données acquises par les flotteurs profileurs dans les diverses zones océaniques ont ouvert la voie à une vision 3D de certains processus biogéochimiques à partir des observations satellitaires. En terme de niveaux trophiques supérieurs, l'intégration entre donnée satellite et télémétrie animale a mis l'accent sur le rôle des systèmes frontaux en tant que lieux d'interaction trophique et d'agrégation pour la mégafaune marine.

### 2.2. Physique de la mesure

Améliorer la précision des variables déduites des mesures satellitaires et déterminer de nouvelles variables requièrent de bien comprendre et modéliser les liens théoriques entre les observables et la mesure au niveau du satellite. Les principaux axes de recherche ont concerné:

- ✓ Algorithmes de couleur de l'océan. L'étude des paramètres optiques se poursuit et s'associe à des innovations instrumentales in situ pour améliorer ces algorithmes. Des paramètres comme la rétrodiffusion, l'absorption, l'atténuation ou la polarisation sont toujours au coeur des projets de recherche. Les études d'anomalies bio-optiques régionales permettent en retour une meilleure compréhension des processus biogéochimiques et le développement d'algorithmes régionaux.
- ✓ Salinité/radiométrie bande L. La modélisation du signal radiométrique en bande L s'est grandement améliorée grâce à la multiplication des mesures et à des développements de nouveaux modèles

physiques. Il reste néanmoins des incertitudes, par exemple liées à l'influence de la hauteur significative des vagues et les variations observées avec la SST ne sont pas totalement expliquées. Ces mesures permettent également la détection des vents extrêmes, y compris sous les nuages, qui sont utilisés dans certains centres météorologiques.

- ✓ Altimétrie/Etat de mer. En 2014, l'altimétrie en bande Ka venait juste de naître avec SARAL/AltiKa et le SAR n'était disponible avec CryoSat-2 que sur certaines zones. La bande Ka apparaît de plus en plus comme incontournable pour l'altimétrie du futur (e.g. SWOT). En ce qui concerne le mode SAR, Sentinel-3 a clairement montré une avancée majeure en termes de précision de la mesure. Il reste malgré tout des efforts à faire en ce qui concerne la physique de la mesure. Par exemple, la correction d'état de mer (SSB) doit être affinée par l'utilisation de modèle de vagues et/ou à l'aide de mesures complémentaires vents/vagues s'appuyant par exemple sur les missions Sentinel-1 et CFOSAT. Cette très importante synergie avec d'autres missions spatiales est donc à maintenir et renforcer.

### 2.3. Détection et quantification des changements climatiques

Un traitement amélioré des observations TOPEX/Poseidon a permis d'identifier pour la première fois une accélération significative dans l'élévation du niveau de la mer global entre 1993 et 2017 essentiellement due à une perte de masse accélérée des calottes de glace au Groenland et en Antarctique. Ces données 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 le déséquilibre énergétique de la Terre avec une précision inégalée. Plus généralement, les données de niveau de la mer en hauturier ont atteint un tel niveau de maturité depuis 5 ans qu'elles sont utilisées de manière systématique dans toutes les études multivariées de la dynamique océanique; aujourd'hui la majorité des nouvelles études concerne la caractérisation du déséquilibre énergétique de la planète, la zone côtière et les impacts associés à la hausse du niveau de la mer.

Les observations spatiales (altimétrie radar et laser, gravimétrie, images SAR) permettent d'établir la topographie des calottes polaires et de suivre leurs bilans de masse et leurs variations temporelles, l'épaisseur et la fracturation de la glace de mer et le vèlage des icebergs. Un progrès significatif concerne le retraitement des observations radar qui permet aujourd'hui d'estimer l'épaisseur de glace de mer depuis 2002 en Arctique et de remonter potentiellement jusqu'en 1991. Par ailleurs la combinaison de fréquences Ku/Ka sur différentes missions (SARAL/AltiKa, CryoSat-2, Sentinel-3) permet aujourd'hui de mesurer l'épaisseur de neige à la surface de la banquise, ce qui ouvre la voie à l'estimation de l'épaisseur de la glace de mer et de son évolution temporelle en Antarctique.

De nouvelles approches ont permis d'assurer une meilleure cohérence interne aux données couleur de l'océan multicapteurs sur maintenant deux décennies, et de nourrir des études visant à comprendre la variabilité décennale de la biomasse phytoplanctonique à l'échelle globale, et leur variabilité saisonnière et interannuelle à l'échelle régionale (Atlantique Nord, Kerguelen, Arctique). Elles ont également permis d'étudier l'évolution de la concentration en carbone organique particulaire et dissous en océan ouvert et en côtier.

### 2.4. Environnement et société

Le lien fort entre les agences spatiales, la communauté recherche et les développeurs de produits opérationnels permet aujourd'hui d'assurer une utilisation optimale des différents produits satellites. Cette démarche a sensiblement amélioré la prévision océanique des différentes variables observées à différentes échelles spatiales et temporelles et permet de mieux spécifier les besoins pour les futures missions. L'océanographie opérationnelle en France et en Europe s'est structurée au cours des dernières années, en particulier avec la mise en œuvre du service marin de Copernicus coordonné par la France.

La variabilité de l'environnement océanique dérivée des observations spatiales a aussi contribué à la définition des aires marines protégées, comme dans le cas de l'extension de la réserve naturelle de Kerguelen, et est amenée à jouer un rôle de plus en plus important dans la gestion des ressources marines.

### 2.5. Missions

Les inquiétudes émises lors du dernier séminaire de prospective sur la fragilité de la constellation altimétrique sont retombées suite aux lancements réussis et aux excellents résultats des missions AltiKa, Jason-3 et Sentinel-3 (A&B) mais aussi sur le long terme par une programmation qui pérennise la constellation jusqu'en 2030 environ, en grande partie grâce à Copernicus mais aussi grâce aux engagements des différentes agences

(CNES, ESA, EUMETSAT, NASA, NOAA) : Sentinel-6/Jason-CS (A en 2020 / B en 2025), Sentinel-3 (C en 2023 / D en 2025), SWOT (2021).

La mission CFOSAT vient d'être lancée avec succès permettant la mesure du spectre des vagues à l'aide de l'instrument SWIM. Des évolutions de SWIM sont d'ores et déjà prévues et ont conduit à la proposition d'une nouvelle mission de mesure des courants de surface (SKIM), et qui a été pré-sélectionnée à EE9. La vitesse totale accessible par SKIM, diffère des courants géostrophiques accessibles par l'altimétrie, et permettrait de mieux caractériser les transports en surface, les courants à l'équateur (divergence, upwelling) et au voisinage des glaces.

Le CNES a fortement aidé à la préparation de la mission de couleur de l'océan en orbite géostationnaire OCAPI, qui a été présentée à EE9, mais malheureusement non retenue car ne rentrant pas dans le cadre de cet appel d'offres. Des études sur le potentiel des mesures LIDAR ont été menées et encouragent à poursuivre le développement de cet outil dans le domaine de la biogéochimie, notamment pour avoir accès à des informations sur la colonne d'eau.

## 2.6. Structuration de la communauté

La communauté s'est organisée autour de groupes mission fortement soutenus par le TOSCA (SMOS, OCAPI, 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. Un effet structurant de ces groupes a été de tisser des liens entre la communauté spatiale et des communautés menant des expériences in-situ. La pérennité de ces groupes mission a créé un point d'ancrage autour duquel les acteurs des différentes communautés peuvent continuer de se retrouver.

Par ailleurs, ces dernières années ont vu émerger une communauté côtière de plus en plus présente et active tant les enjeux sociétaux et scientifiques sont importants. Ceci est intimement lié à l'amélioration de la mesure altimétrique (bande Ka, mode SAR) mais aussi aux efforts d'amélioration des algorithmes qui ont été mené de concert entre l'OSTST et les meetings « coastal altimetry ».

Au-delà des publications, un certain nombre des recherches spatiales produisent des jeux de données et/ou des algorithmes de traitements d'intérêt pour la communauté. Ceux-ci peuvent être valorisés dans le cadre du pôle de données ODATIS. Dans une seconde étape, ces données et services peuvent concourir au niveau européen pour intégrer des initiatives ESA/CCI ou des services Copernicus (C3S, CMEMS). Ils sont alors labellisés et bénéficient de financements complémentaires leur permettant d'être opérés dans la durée et d'être améliorés (retraitements). Le TOSCA et le pôle ont alors pleinement joué leur rôle d'incubateur.

## 3. Recommandations et priorités du groupe océan

Les recommandations concernent les futures missions spatiales, les segments sols et l'exploitation des données, les activités Cal/Val et le soutien aux observations in-situ et la structuration et l'accompagnement de la recherche spatiale.

### 3.1. Contexte

Les missions d'océanographie spatiale relevant de cette prospective et pour la prochaine décennie seront principalement menées dans le cadre du programme Européen Copernicus, du programme Earth Explorer de l'ESA et de coopérations spécifiques entre le CNES et des agences internationales.

Les missions déjà décidées incluent :

- ✓ Constellation des Sentinel 1 (SAR), 2 (optique haute résolution), 3 (température de surface, couleur de l'océan et altimétrie) et 6 (Jason-CS, altimétrie de référence).
- ✓ Mission SWOT en coopération avec la NASA (ainsi que UK et Canada) pour l'étude de la dynamique océanique à haute résolution et l'hydrologie.
- ✓ Missions Earth Explorer de l'ESA pouvant intéresser la communauté océan (EE-8/Flex).

Les principales missions en préparation incluent :

- ✓ La mission Earth Explorer de l'ESA EE-9 SKIM pour la mesure directe des courants de surface et l'amélioration du suivi des spectres de vagues. D'autres missions Earth Explorer sont aussi d'intérêt pour cette prospective (e.g. Stereoid EE-10).

- ✓ Le programme expansion des Sentinel avec en particulier les missions CIMR (Copernicus Imaging Microwave Radiometer) (micro-onde pour la concentration des glaces, la température de surface, la salinité et l'épaisseur fine des glaces) et CRISTAL (Copernicus Polar Ice and Snow Topography Altimetry) (la topographie des océans en zone polaire, l'épaisseur des glaces de mer et le suivi des calottes glaciaires).
- ✓ La préparation de l'évolution à long terme (post 2028) des Sentinel avec notamment l'introduction de l'altimétrie à fauchée (WiSA) pour l'évolution de la composante topographie des Sentinel 3 mais aussi les évolutions à apporter aux autres Sentinel concernant l'océan (Sentinel 1, 2 et 6).
- ✓ Des mesures de salinité de surface à haute résolution spatiale (SMOS-HR avec un gain d'un facteur 4 en résolution par rapport à SMOS, ULID concept de 3<sup>ème</sup> génération visant une rupture technologique permettant d'atteindre dans le futur la résolution kilométrique)
- ✓ De nouveaux concepts d'instruments ou de missions proposés dans le cadre de cette prospective : MARVEL (système de référence, champs de gravité variable avec des performances supérieures d'un facteur 5 à 10 par rapport à GRACE), GLISTERO (mesure via le sun glint des variations de rugosité et de la dynamique océanique de surface (convergence/divergence)).
- ✓ Des missions en coopération bi ou multilatérales dont l'objectif principal ne concerne pas l'océan mais qui sont potentiellement intéressantes pour notre communauté: TRISHNA mission multispectrale spatiale franco-indienne (CNES - ISRO) permettant la mesure de la température de surface à très haute résolution et MESCAL (NASA-CNES) pour la mesure de la couleur de l'océan par lidar.
- ✓ Des nouvelles missions développées dans un cadre hors CNES mais pour lesquelles la communauté scientifique française devrait s'impliquer notamment vis-à-vis de l'hyperspectral (e.g. PRISMA, PACE).

### 3.2. Priorités vis-à-vis des missions spatiales

Les priorités de la communauté océan pour les futures missions spatiales se déclinent selon plusieurs axes :

- ✓ Continuité des mesures.
- ✓ Amélioration des résolutions spatiales et temporelles et de la précision des mesures.
- ✓ Mesure de nouveaux paramètres.

Les priorités sont classées en trois catégories: P0 (mission ou concept d'intérêt majeur), P1 (mission ou concept d'intérêt fort) ou P2 (mission ou concept potentiellement intéressant). Les priorités prennent en compte la faisabilité des concepts ou missions, l'impact pour la recherche et l'océanographie opérationnelle et l'existence d'une communauté nationale structurée autour des missions ou concepts proposés.

Il est essentiel vis-à-vis des enjeux liés au climat et à l'océan, mais aussi pour le besoin des services océaniques (Copernicus Marine Service), d'assurer une continuité des mesures. Au-delà des missions Sentinel actuelles qui continueront leurs observations sur la prochaine décennie, la mise en place des missions CIMR et CRISTAL proposées dans le cadre du programme Sentinel expansion sont une priorité forte (P0) 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. Le CNES devra s'assurer que ces priorités soient reprises par l'UE et l'ESA dans le cadre de Copernicus et que les besoins des communautés océan et glace françaises soient bien prises en compte dans le design de ces missions.

Le développement de l'altimétrie à fauchée avec SWOT est potentiellement une révolution en océanographie et océanographie opérationnelle et le groupe recommande fortement une démarche pro-active pour inclure l'altimétrie à fauchée WISA (P0) dans le scénario à long terme de Copernicus (mission topographie de Sentinel 3) afin d'assurer une suite opérationnelle à la mission SWOT. L'objectif est le suivi de la mésoéchelle et submésoéchelle océanique et l'intégration de ces données dans les futurs systèmes d'analyse et de prévision océanique à haute résolution.

Au-delà de WISA, la communauté scientifique française doit aussi être pleinement impliquée dans les réflexions sur l'évolution à long terme des Sentinel (Long Term Scenario) (Sentinel 1, 2, 3 et 6).

La mission SKIM EE-9 portée par la France va permettre pour la première fois une mesure directe du courant de surface, une Essential Ocean Variable (EOV) complémentaire des mesures de topographie par altimétrie. Le groupe soutient avec une très forte priorité cette mission (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.

La communauté océan/biogéochimie a mis en priorité forte (voir prospectives précédentes) le développement d'une mission géostationnaire couleur de l'océan sur l'Europe (GEO-OCAPI). Il est très regrettable qu'un cadre programmatique n'ait pas pu être trouvé 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. Copernicus est le cadre programmatique naturel pour une mission de ce type avec une insertion à plus long terme sur les futures plates-formes Meteosat (Meteosat 4<sup>ème</sup> génération). Le besoin de mission hyperspectrale est aussi affirmé (P1) et la communauté note l'intérêt des concepts de type Lidar (MESCAL) (P2). On note aussi l'intérêt de la communauté pour la mission Eumetsat METOP Second Generation et son Multi-Viewing Multi-Channel Multi-Polarisation Imaging instrument (3 MI). Les observations incluant la polarisation permettent une meilleure caractérisation de la nature chimique (via l'indice de réfraction) et de la taille des particules marines, en particulier dans les eaux océaniques productives, et dans les eaux côtières.

Le groupe recommande parallèlement de poursuivre l'instruction de nouveaux concepts prometteurs pour la mesure des variations du champ de gravité (MARVEL) (P1) et de la salinité à haute résolution (SMOS-HR, ULID) (P1). Il note l'intérêt potentiel de la mission TRISHNA (P1) pour l'océan côtier. Une démonstration du concept GLISTERO est également souhaitable (P2).

L'objectif de MARVEL est la détermination du système de référence terrestre et le suivi de la redistribution des masses. Les performances annoncées (facteur 5 à 10 par rapport à GRACE), si elles sont confirmées lors d'une étude de phase A, rendent cette mission très attractive pour l'océanographie: compréhension des mécanismes responsables de l'augmentation du niveau de la mer, bilan énergétique de la planète, complémentarité avec l'altimétrie voire assimilation dans les modèles.

L'observation de la SSS à mésoéchelle permet avec les mesures de SST de contraindre la densité de surface ce qui revêt une grande importance pour comprendre les échanges océan-atmosphère, l'évolution des cyclones, la dynamique océanique du large à la côte et mieux contraindre les systèmes d'analyse et de prévision océanique. Le groupe océan est donc très favorable au développement de nouveaux concepts pour la mesure de la salinité de surface à haute résolution (SMOS-HR, ULID).

TRISHNA donne l'opportunité de mesurer en zone côtière la SST à très haute résolution (50 et 100 m) avec une période de revisite de 1 à 3 jours. Cette mission ouvre des perspectives sur de nombreux travaux scientifiques associés à des questions liées à l'écologie marine et/ou la dynamique océanique comme par exemple le suivi de gradients de courant, la dynamique des upwellings ou la cartographie des habitats benthiques.

### 3.3. Algorithmie, exploitation des données et pôles de données

Le travail permanent sur les algorithmes est une composante essentielle de la réussite d'une filière (e.g. altimétrie). Le CNES se doit de soutenir les équipes algorithmiques (niveaux 1 et 2) et doit s'assurer d'une bonne coordination entre les différentes agences partenaires (e.g. ESA, Eumetsat, NASA, ISRO). Le support aux Science Team internationales et la prise en compte de leurs recommandations est un élément clé du succès d'une filière.

L'exploitation des longues séries de données multi-capteurs pour l'ensemble des ECVs Océan va demander un effort conséquent (recherche et opération) pour assurer leur homogénéisation. Le CNES doit s'engager avec l'ESA (programme CCI), Eumetsat et le programme Copernicus (C3S, CMEMS) pour mettre en œuvre cette exploitation.

Les gros volumes de données couplés à une plus haute résolution imposeront probablement le recours à des méthodes de classification des données utilisant les techniques du big data et de l'IA. Les bénéfices attendus concernent les aspects algorithmiques, le contrôle qualité lors de la Cal/Val et tout au long de la mission mais



aussi l'exploitation des données. Ces techniques peuvent permettre de révéler des relations entre variables et/ou des téléconnexions entre événements.

L'explosion du volume des données à traiter et à retraiter implique des moyens de stockage et de calcul massifs. Avec la quantité et la diversité croissante des données, le traitement et l'accès aux données doivent être considérés comme un tout. Les pôles de données devraient évoluer et être couplés à des moyens de calcul pour prendre en compte les nouvelles stratégies algorithmiques, le big data et l'IA. Le développement des plates-formes DIAS (et PEPS) va dans ce sens et le positionnement des pôles de données par rapport aux DIAS devra être clarifié. Des moyens nouveaux doivent être, par ailleurs, affectés afin que les pôles (dont ODATIS pour l'océan) puissent répondre aux besoins des équipes scientifiques (e.g. mise à disposition de jeux de données). La mise en cohérence des différents pôles est également nécessaire pour mieux servir la communauté climat.

A long terme, une refonte de la stratégie d'acquisition, de production et de gestion des données spatiales pourrait être envisagée. Cela comprendrait des réflexions sur le pilotage fin des acquisitions, la souplesse des traitements à bord, le stockage et le traitement des données. L'utilisation d'une programmation agile (sur la base d'informations issues de prévisions opérationnelles) a permis l'observation des cyclones avec Sentinel-1. Il faut assurer la pérennité de cette stratégie d'acquisition.

### 3.4. Activités cal/val et observations in-situ

Le développement de l'observation spatiale doit s'accompagner d'une évolution de l'observation in-situ, que ce soit pour l'étalonnage/validation ou la valorisation. Il est indispensable que le CNES renforce sa coopération avec les organismes en charge de l'observation in-situ et développe une politique inter-agences (ESA, Eumetsat, Copernicus) sur les aspects Cal/Val. L'enjeu est de mettre en place un support programmatique pérenne pour l'observation in-situ nécessaire aux activités Cal/Val (non limité à une mission particulière mais plutôt lié à une « filière », comme la radiométrie couleur de l'océan ou l'altimétrie). Cela inclut aussi l'archivage à long terme et pérennisé des données de Cal/Val. Ces mécanismes devraient être organisés conjointement avec les agences nationales mais également au niveau Européen. Cela implique également un soutien renforcé sur le long terme à Coriolis et aux TGIR, IR et SO traitant de l'observation in-situ des océans et nécessaires à la recherche spatiale.

### 3.5. Accompagnement de la recherche spatiale

En regard du nombre de missions actuelles ou futures (notamment dans Copernicus), un renforcement du support aux équipes françaises impliquées dans l'exploitation des données des missions en cours nous semble indispensable au niveau des développements de simulateurs, des études de design de missions, de la mise au point et de l'amélioration des algorithmes, et de l'exploitation scientifique des observations.

Le CNES a joué un rôle pionnier et moteur dans la mise en place et la pérennisation de la filière altimétrique mais aujourd'hui cette filière est prise en charge naturellement par Copernicus. Pour autant le CNES doit continuer et renforcer son accompagnement de la recherche, notamment liée à l'altimétrie, au-delà d'un soutien lié à une ou plusieurs missions dont il a la charge (e.g. SWOT).

La mise en place de simulateurs end-to-end et collaboratifs capables d'accompagner la préparation de concept-missions innovants et les phases de cal/val de ces missions serait très souhaitable. Ces simulateurs incluraient de manière cohérente les besoins de modélisation de la surface océanique et des interactions ondes/surfaces. Le développement systématique d'approches de type OSSEs (Observing System Simulation Experiments) est nécessaire pour analyser l'impact de missions futures dans des systèmes d'assimilation de données.

Le maintien des compétences en physique de la mesure sur les traitements de niveau 1 à 2 est essentiel. Les nouveaux concepts instrumentaux tels que l'altimétrie SAR (possiblement à large fauchée comme SWOT) ou le spectromètre radar qui fonctionne en proche nadir (SWIM ou SKIM), le renforcement des observations en radiométrie microonde en Europe pour les observations SSS et SST nécessitent de maintenir et renforcer les compétences en physique de la mesure dans les laboratoires.

L'accompagnement de la préparation des missions au travers de CDD et/ou de sous-traitance est jugé inadéquat pour pérenniser les compétences, assurer le lien entre les thématiciens et les agences spatiales, et continuer à être force de propositions pour de nouveaux concepts. Par ailleurs, l'absence de perspectives (liée à ce mode de fonctionnement) diminue fortement l'attractivité des filières (universitaire ou grandes écoles) en physique

de la mesure pour l'observation de la Terre. Le CNES doit influencer sur la politique des postes permanents dans la recherche spatiale (techniciens, ingénieurs de recherche, chercheurs).

### 3.6. Synthèse des recommandations

Type de mesure/d'observables	Cadre de réalisation	Activité associée	Thème scientifique
Courant de surface	ESA (EE-9) ou opportunité	Phase A	Courant de surface total
Couleur de l'océan /GEO	Opportunité (et/ou Copernicus LTS)	Mure	Dynamique côtière haute fréquence et biologie
Glace de mer (concentration, épaisseur), température de surface, salinité de surface	EU / Copernicus Expansion CIMR	Activités ESA	Evolution des zones polaires
Glace de mer (épaisseur), Calottes glaciaires, topographie (océan)	EU / Copernicus Expansion CRISTAL	Activités ESA Technologie bande Ka (CNES)	Evolution des zones polaires
Topographie de surface à haute résolution	EU / Copernicus LTS (WiSA)	Phase A CNES Activités ESA	Mésoéchelle/submésoéchelle Prévision océanique
Champ de gravité	Opportunité Concept Marvel	Phase 0 GRICE, démonstrateur	Variations du champ de gravité
Salinité de Surface	Opportunité Concept SMOS-HR	Phase 0 SMOS HR Interferométrie distribuée bande L, Phase A Ulid	Salinité de surface à mésoéchelle
Couleur de l'océan/hyperspectral	EU / Copernicus Expansion CHIME	Activités ESA Imageur Hyperspectral compact	Nouveaux paramètres biologie (e.g. types de phytoplancton)
Température de surface	Coopération ISRO-CNES TRISHNA	Détecteur IR	Côtier/Littoral
Couleur de l'océan/Lidar	Opportunité MESCAL	Diverses activités technos sur LIDAR	Apport lidar vs optique passive
Sun glint	Opportunité Concept GLISTERO		Dynamique océanique de surface