

Prospective Scientifique Océanographie Opérationnelle

La prospective scientifique de l'océanographie opérationnelle a donné lieu au rapport provisoire ci-joint que nous vous soumettons dans le but de vous associer à la rédaction du rapport final qui sera remis aux organismes. Nous rappelons ici les différentes étapes et vous sollicitons pour l'étape N°3

1. ETAPE 1 – JANVIER -AVRIL 2013: CONSULTATION DE LA COMMUNAUTE

Consultation des communautés scientifiques recherche et opérationnelle lors du séminaire d'Autrans (Janvier 2013) et des journées GMMC de Toulouse (Avril 2013). Ces travaux prospectifs ont impliqué les différents acteurs du sujet : les projets opérationnels, le conseil scientifique du GMMC, les organismes, des experts non français, des scientifiques ayant contribué aux travaux précédents et des scientifiques nouveaux dans cette approche.

2. ETAPE 2 - 6 MAI-15 JUILLET 2013: REDACTION DU RAPPORT DE PROSPECTIVE

Rédaction par le comité de pilotage du rapport provisoire de « Prospective scientifique de l'océanographie opérationnelle ». Ce rapport résulte de la synthèse des travaux réalisés au séminaire d'Autrans et aux journées GMMC de Toulouse a été rédigé par les membres du comité de pilotage, Pierre Bresseur, président sortant du CS GMMC coordonnant la partie bilan, et Bernard Barnier, actuel Président du CS GMMC, coordonnant la partie prospective.

3. ETAPE 3 – 16 JUILLET – 28 SEPTEMBRE 2013: EVALUATION DU RAPPORT PAR LA COMMUNAUTE

Diffusion de la version provisoire du rapport à la communauté scientifique, collecte des remarques et suggestions en vue d'établir la version finale avec les scientifiques impliqués.

Nous vous invitons à réagir à ce rapport, à nous communiquer de façon constructive vos remarques et critiques, à nous faire part des oublis et des suggestions que vous juger pertinentes pour améliorer ce document. Envoyer vos réactions avant le 28 Septembre à Bernard Barnier: bernard.barnier@legi.grenoble-inp.fr

4. ETAPE 4 – 30 SEPTEMBRE – 4 OCTOBRE: REDACTION/DIFFUSION DU RAPPORT FINAL

Rédaction par le comité de pilotage du rapport final de la prospective scientifique de l'océanographie opérationnelle. Diffusion aux organismes et à la communauté scientifique le 4 octobre 2013.

Nous vous remercions pour votre contribution à ce long processus.

Très cordialement
Bernard Barnier



Président du CS du GMMC

Prospective Scientifique de l'océanographie opérationnelle

Rapport provisoire au 11/07/2013

Contenu

1	Introduction.....	2
1.1	L'océanographie opérationnelle et son domaine scientifique.....	2
1.2	L'exercice de prospective.....	3
2	Contexte de développement sur les 20 dernières années.....	4
2.1	Vingt ans de développement rapide.....	4
2.2	Les éléments de contexte qui ont compté.....	4
3	Bilan scientifique des vingt premières années.....	8
3.1	Les fondements scientifiques de l'océanographie opérationnelle : enjeux et défis.....	8
3.2	Avancées marquantes de la recherche et déclinaisons opérationnelles.....	9
3.3	Mécanismes et instruments programmatiques de transfert de la recherche aux applications.....	15
3.4	Forces et faiblesses identifiées.....	15
3.5	Ce qu'on en retient.....	16
4	Contexte de développement sur les 10 ans à venir.....	17
4.1	Les enjeux liés à l'océanographie opérationnelle, et les attentes des utilisateurs et des financeurs.....	17
4.2	Les enjeux scientifiques liés à cette discipline.....	17
4.3	A propos des infrastructures, à propos de GMES/Copernicus et des programmes internationaux.....	18
4.4	A propos des Mercator Océan, Coriolis et Previmer.....	19
4.5	Ce qu'on retient : Opportunités et menaces.....	19
5	Prospective scientifique sur les 10 ans à venir.....	20
5.1	Des choix nécessaires dans les priorités scientifiques.....	20
5.2	Contours et composantes du Futur Système Opérationnel Générique.....	22
5.3	Des chantiers scientifiques structurants pour notre communauté.....	27
6	Conclusion.....	29

Partie 1 : Présentation

1 Introduction

1.1 L'océanographie opérationnelle et son domaine scientifique

L'océanographie opérationnelle consiste à élaborer et mettre à disposition d'un utilisateur l'information sur l'océan qu'il recherche avec la précision et la fiabilité nécessaires pour l'usage qu'il en fait.

Le besoin et les solutions pour y répondre ont toujours existé et toujours évolué, mais l'émergence de techniques d'observations temps réel précises, la disponibilité de puissances de calcul et la maturité des techniques de modélisation, de traitement et d'assimilation de données ont permis une rupture franche au début des années 90, et fortement dynamisé la discipline : sous sa forme moderne, l'océanographie opérationnelle se base sur la combinaison d'informations issues de satellites, d'instruments en mer et de modèles numériques et permet de décrire en temps réel et en tout endroit du globe l'état physique et biogéochimique de l'océan. Il existe désormais à travers le monde plusieurs dizaines d'équipes impliquées dans cette forme opérationnelle de l'océanographie, coopérant dans des programmes internationaux, collaborant dans des projets de recherche, et contribuant à la structuration d'une nouvelle capacité de service en océanographie et à l'émergence de centres d'océanographie opérationnelle.

La France est l'une des nations les plus avancées dans ce domaine. Son action a toujours été marquée par une forte ambition scientifique et technique – qu'illustre bien le défi posé d'emblée de décrire la méso-échelle océanique sur l'ensemble du globe – et par une stratégie alliant de façon indéfectible la recherche d'une fiabilité opérationnelle à celle de l'excellence scientifique. Les projets Mercator (modèle), Coriolis (in situ) et Jason (spatial), étayés plus récemment par le projet Previmer (côtier), ont formé pour cela un cadre de référence pour la communauté scientifique et technique et ses projets de recherche.

Les applications visées touchent à des domaines très divers liés à l'environnement marin, à sa gestion, à sa surveillance, à ses ressources et à son influence sur les milieux frontières que sont l'atmosphère et le littoral. Mais l'une des clés du succès de l'initiative française tient à la volonté de rechercher d'abord un cœur commun d'actions aux différentes équipes d'océanographie françaises pour mutualiser les efforts et les compétences : élaborer la meilleure description opérationnelle de l'océan lui-même (sans céder trop vite à la nécessité de spécialiser l'information selon le domaine applicatif) a constitué et constitue encore cet objectif structurant. Cette stratégie constitue aussi un point d'ancrage important pour l'action de recherche.

En cherchant à élaborer la meilleure description numérique de l'océan dans ses quatre dimensions, l'océanographie opérationnelle sollicite des efforts de recherche dans le domaine du traitement des observations issus des satellites et d'instruments in situ, de la modélisation numérique et de l'assimilation de données, et de la validation et de l'interprétation océanographique des informations produites. Aux exigences associées à ces différents domaines, l'océanographie opérationnelle ajoute celle de la cohérence temporelle, spatiale, inter-variables et inter-échelles de l'analyse numérique produite puisqu'en final celle-ci doit répondre aux attentes de diverses applications. L'océanographie opérationnelle exige donc des méthodes scientifiques permettant une description des fines échelles comme des grandes échelles, réaliste en temps réel mais qui soit également cohérente dans le temps sur des dizaines d'année (réanalyses), reproduisant tout autant les mouvements lents des profondeurs et ceux rapides des couches de surface, et compatibles avec les couplages nécessaires avec des modèles décrivant des physiques et des échelles différentes ... Adossés à ces défis scientifiques s'ajoutent des défis technologiques liés à la dimension numérique des systèmes représentés : la science liée à l'océanographie opérationnelle implique la maîtrise de plates-formes de modélisation et d'assimilation de plusieurs milliers de lignes de code, du calcul

scientifique haute performance et de manipulation de jeux de données de grande dimension. La performance technique des systèmes conçus au niveau recherche est une des contraintes inhérente à l’océanographie opérationnelle.

D’abord abordés pour la physique de l’océan hauturier, les domaines d’expertise concernés s’étendent en effet aujourd’hui à la biogéochimie marine, au domaine littoral et côtier et aux zones polaires englacées, ajoutant autant de complexité et de défis scientifiques à maîtriser.

1.2 L’exercice de prospective

La stratégie de l’océanographie opérationnelle française a été définie dans ces lignes principales en 1995 et les objectifs qu’elle dressait ont été atteints. Il s’agissait d’être capable de décrire et prévoir l’océan sur l’ensemble du globe au 1/12°, en assimilant en temps réel les observations spatiales et in situ dans un modèle, pour contribuer au développement d’applications avales. C’est une réalité aujourd’hui. La dynamique française a trouvé des échos au niveau international, et contribue largement à la structuration d’une initiative de l’UE pour un service communautaire. Les structures qui portent les éléments opérationnels de l’océanographie opérationnelle française (la société Mercator Océan, la convention Coriolis, le projet Previmer) sont toutes à des points de transition stratégique de leur développement.

En mars 2012, les organismes français impliqués dans ces initiatives ont souhaité que soit organisé un exercice de prospective scientifique pour recueillir auprès de la communauté scientifique française sa vision prospective de l’évolution de l’océanographie opérationnelle sur les 12 ans à venir.

Un comité de prospective a été constitué, rassemblant les membres du conseil scientifique du GMMC, des représentants des organismes publics impliqués et des experts internationaux.

Au cours du second semestre 2012, le comité s’est d’abord attaché à conduire le bilan scientifique des dix ans passés, mobilisant la communauté en douze groupes de travail traitant chacun d’un domaine d’activité scientifique différent, tous importants pour l’océanographie opérationnelle. Les conclusions ont été mises en commun lors du séminaire d’Autrans qui a réuni le comité en janvier 2013. Au cours du 1^{er} semestre 2013, le comité a travaillé sur la prospective elle-même, traçant les lignes d’un projet scientifique structurant pour les 10 ans à venir. Les journées scientifiques du GMMC, organisées à Toulouse en avril, ont été l’occasion d’un dialogue direct avec la communauté. L’exercice s’achève avec l’édition de ce rapport, qui servira de base à la restitution des conclusions aux directions d’organismes impliqués dans l’océanographie opérationnelle française.

Partie 2 : Le développement 1992-2013

2 Contexte de développement sur les 20 dernières années

2.1 Vingt ans de développement rapide

Au cours des deux décennies passées, une transformation majeure du paysage de l'océanographie s'est opérée en France, avec la mise en place de services opérationnels d'océanographie. En effet, il y a 20 ans (en 1992) Mercator Océan, CORIOLIS et PREVIMER n'existaient pas. Le principal moteur de cette mise en place a été l'impulsion donnée par les organismes publics liés à l'océanographie, tout particulièrement par son CDO (comité des Directeurs d'Organismes) qui réunissait les représentants des directions générales des organismes et définissait les orientations de l'océanographie opérationnelle en France. C'est ainsi qu'a été entre autre discuté et décidé les principaux aspects liés à l'altimétrie, à CORIOLIS et à Mercator Océan. Ceci a été rendu possible grâce à la communauté recherche, suite à la réunion fondatrice de la Chapelle Aubareil en 1995. Le lancement réussi de deux satellites altimétriques, ERS-1 (ESA) en 1991 et de TOPEX-POSEIDON (NASA/CNES) en 1992, allaient ouvrir l'ère moderne de l'observation des océans depuis l'espace. L'émergence de capacité de calcul et la mise en place d'outils de modélisation (NEMO) et d'assimilation allaient compléter le tableau. C'est sur ce triptyque (observation, modèle et assimilation) que s'est construit dans les deux décennies passées l'océanographie opérationnelle en France.

On peut diviser schématiquement la période passée en deux parties pour le développement de l'océanographie opérationnelle en France : la première décennie a permis de passer de la recherche aux opérations, avec en 2001 la publication du premier bulletin de prévision Mercator Océan (s'appuyant sur un système issu principalement de programme de recherches : CLIPPER pour la modélisation et SOFA pour l'assimilation). En 2007 le réseau de profileurs Argo atteignait la couverture mondiale de 3000 flotteurs actifs et rentrait dans une phase de pérennisation. La décennie suivante a permis d'étendre la capacité de production et de consolider la capacité de service opérationnel en délivrant les produits numériques de qualité aux utilisateurs.

Pendant cette période, la France n'a pas agi seule : au niveau Européen s'est rapidement mis en place un réseau d'instituts qui ont développé ensemble la capacité Européenne de production d'information généraliste de l'océan (observations in situ et satellites, prévisions et analyses) coordonnée aujourd'hui par Mercator Océan dans le cadre des projets MyOcean (Copernicus/GMES), et au niveau mondial GODAE (et son successeur GODAE OceanView) est un forum où les scientifiques partagent leur expérience liée à la mise en œuvre opérationnelle d'outils de modélisation et d'assimilation. Ce forum regroupe des initiatives d'Océanographie Opérationnelle en Europe, aux Amériques, en Asie et en Océanie.

2.2 Les éléments de contexte qui ont compté

2.2.1 Les grandes infrastructures

- L'océanographie spatiale et la filière altimétrique

La filière altimétrique que nous connaissons aujourd'hui avec SSALTO/DUACS s'est développée dès les années 90, en amont de Mercator Océan et de CORIOLIS. L'acquisition, le traitement et la fourniture des données TOPEX/POSEIDON et ERS de très haute qualité en temps quasi réel (quelques jours au plus tard après leur collecte par le satellite), développée à l'origine par CLS pour le compte du SHOM a été étendue dans le cadre du projet Européen DUACS (Developing Use of Altimetry for Climate Studies) qui a permis de mettre en place les premiers éléments de traitement des données temps réel, à l'origine des chaînes SSALTO/DUACS. Notons que la nécessité de prévoir une filière temps réel afin de servir

l'océanographie opérationnelle a été prise en compte de façon constante par les agences spatiales, particulièrement le CNES.

- L'océanographie in situ et le programme Argo

Avec ses 3 000 flotteurs profilants (petits robots autonomes) qui mesurent la température et la salinité depuis la surface jusqu'à 2 000 mètres de profondeur sur l'ensemble des océans, le programme international Argo, lancé en 2000 et réunissant plus de 30 pays, est le premier réseau mondial d'observation in situ des océans en temps réel. Il constitue le complément indispensable des mesures satellitaires permettant d'observer, comprendre, et à terme, prévoir le rôle de l'océan sur le climat de la planète. Chaque année 100 000 profils de température et de salinité sont collectés, soit vingt fois plus que le nombre de profils collectés à bord des navires de recherche. L'utilisation des données Argo a permis des avancées majeures dans la représentation de l'océan nécessaire à la prévision climatique saisonnière, la compréhension de l'élévation globale du niveau des mers, l'analyse des variations de la circulation océanique et des zones de convection profonde. Les données Argo sont utilisées en routine par les systèmes d'océanographie opérationnelle (Mercator Océan, GMES Marine Service) et pour leurs applications. Les données Argo ont contribué également à apporter un éclairage nouveau sur certaines questions de recherche : en particulier sur les processus de formation des eaux profondes en hiver dans les régions polaires qui remplissent ensuite les bassins océaniques et le transfert de chaleur et d'eau sous les ouragans.

- La puissance de calcul

L'émergence de nouveaux moyens de calcul a permis de mettre en machine des gros codes de simulation numériques de l'océan et d'assimilation de données, fondations des services actuels de prévision globale de la dynamique de l'océan y compris dans son aspect tourbillonnaire. La loi empirique de Moore qui avait prédit un doublement de capacité (calcul, stockage, etc...) tous les 18 mois, s'est à peu près vérifiée par le passé ce qui a permis de réaliser le programme défini à la chapelle Aubareil : construire un système global résolvant les tourbillons et faisant la prévision numérique quotidienne de la physique de l'océan en assimilant les données spatiales et in situ. Les mises à jour des moyens opérationnels de calcul et de stockage de Météo France a permis de déployer les capacités d'océanographie opérationnelles dont nous disposons aujourd'hui. Bien que des experts prédisent un tassement de cette augmentation de capacité d'ici la fin de la décennie, il semble raisonnable de considérer une croissance dans le futur similaire à celle que nous avons connu dans les années passées : c'est sur cette hypothèse que se base cette prospective.

- Les codes numériques et l'évolution de NEMO

NEMO, est aujourd'hui un outil incluant un modèle océanique performant (OPA) et un consortium de développeurs et d'utilisateurs faisant évoluer en mode participatif cet outil afin qu'il réponde au mieux aux besoins des communautés opérationnelles et de recherche. C'est ainsi que les principaux OGCM convergent dans leurs performances respectives, par le jeu naturel de l'activité scientifique : une bonne idée publiée par un des groupes est généralement reprise et évaluée par les autres. NEMO est avec HYCOM (leadership américain) l'outil le plus utilisé pour la modélisation hauturière. Il a été récemment adopté par nos collègues Italiens pour leur système opérationnel sur la Méditerranée à (l'INGV) et l'étude du climat (au CMCC) ainsi que par les Britanniques pour l'ensemble de leurs besoins. NEMO est en définitive devenu le standard Européen adopté majoritairement dans le cadre de Copernicus. Le choix d'investir exclusivement sur OPA/NEMO à Mercator Océan a été fait dès sa création, et a été un des aspects très structurant de l'activité modélisation en lien avec la communauté recherche en France et en Europe.

2.2.2 Les programmes inter-organismes français

- Mercator Océan

Mercator (www.mercator-ocean.fr) a commencé sous forme d'un projet dès 1995. Les organismes l'ont fondé en finançant au début l'activité via leurs propres projets (comme le programme SOAP au SHOM). Le groupement d'intérêt public (GIP) Mercator Océan, créé en 2001, a été doté d'un budget mis à disposition par les organismes y participant (sous forme de contributions en nature ou en numéraire). Cette structure a rapidement montré ses limites : elle n'était pas adaptée aux enjeux à long terme, en particulier par rapport à la pérennisation des compétences (personnels) et à l'émergence de Copernicus (GMES). En 2010 Mercator Océan a pris la forme juridique d'une Société Civile financée par les organismes l'ayant créé en 1995 (à l'exception du CNES). La structure désormais pérenne dispose de la manœuvrabilité suffisante en particulier pour participer au programme Copernicus.

- CORIOLIS

CORIOLIS (www.coriolis.eu.org) a démarré en tant que projet pilote en 2001 avec pour mission d'acquérir à partir de flotteurs profilants Argo et de navires de recherche des données in-situ nécessaires à l'océanographie physique à la fois dans ses dimensions opérationnelle et de recherche, de les traiter, de les qualifier et de les distribuer à Mercator et à la communauté de recherche française en temps réel (< 48 heures après l'acquisition). Les activités d'acquisition d'observations se sont fortement appuyées sur des Services d'Observation préalablement en place (PIRATA, SSS, DBCP, lignes répétitives XBT), ou qui se sont structurés au cours de ses dix dernières années (Argo-France, MEMO pour les animaux marins, EGO pour les gliders) et sur les campagnes océanographiques françaises. Le centre de données CORIOLIS s'est bâti sur l'expérience et l'expertise acquise des différents partenaires Ifremer, IRD, INSU-CNRS, SHOM, Météo-France, IPEV et CNES dans les domaines de l'acquisition de données, de la gestion de données et la R&D associée. CORIOLIS a très vite pris une dimension internationale avec la prise en charge du centre global Argo (profileurs), puis du centre équivalent OceanSites (mouillages de référence), GOSUD (données Navires) et l'intégration des données DBCP (bouées dérivantes) et GTS dans sa base de données. Fort de cette expérience, il a été un membre actif de la structuration des échanges de données pour les besoins de l'océanographie opérationnelle européenne au sein d'EuroGOOS ce qui s'est traduit par un rôle de leader dans le montage du Centre Thématique in situ au sein des projets Mersea puis MyOcean et MyOcean2.

- PREVIMER

Le groupe de coordination inter-organismes REDEO créé en 2007 a établi un schéma directeur en 2008 pour l'implémentation, par le biais d'une coopération inter-organismes, d'un dispositif national pérenne d'Océanographie Côtière Opérationnelle (OCO). Le projet PREVIMER, monté en partenariat avec les principaux organismes acteurs de l'OCO française (Ifremer, SHOM et Météo-France), cofinancé par ces organismes, les fonds FEDER et la région Bretagne dans le cadre de deux Contrats de Projets Etat-Région (CPER) successifs, a permis de développer dans un premier temps (2006-2008) des démonstrateurs de systèmes d'observation, d'analyse et de prévision de l'environnement côtier sur les zones métropolitaines Manche/Gascogne/Méditerranée et dans un second temps (2008-2013) de jeter les bases de services opérationnels qu'il reste à pérenniser. Depuis son démarrage, PREVIMER (www.previmer.org) a connu une croissance rapide. Le système mis en place a prouvé ses capacités à fournir des observations et des prévisions côtières sur les trois façades métropolitaines. Il a permis le développement d'applications avalées via les pôles de compétitivité, par des financements européens Inter reg ou bien encore CNES-aval. Le site internet en place depuis 2006 fait l'objet d'un nombre croissant de visites (de l'ordre de 3000 à 5000 par jour) parallèlement à un nombre de demandes de produits numériques qui croît régulièrement (176 depuis 2010) ; cette fréquentation atteste de l'intérêt que représente un tel système auprès de nombreux utilisateurs, publics et privés et de la pertinence des informations diffusées.

- Le GMMC

Le Groupe Mission Mercator Coriolis (GMMC) et son conseil scientifique ont été créés dès le lancement des projets tout d'abord pour Mercator (Groupe Mission Mercator), étendu à CORIOLIS en 2002 et à l'océanographie côtière en 2009. Sa création s'est calquée à l'origine sur le concept des groupes attachées aux missions spatiales (tel que le Science Working Team (SWT) pour l'altimétrie devenu depuis l'OST-ST, ou Ocean Surface Topography Science Team), faisant travailler de concert une équipe projet et les scientifiques dans les laboratoires, afin de faire progresser la qualité des produits. L'objectif a donc été double : d'une part organiser les liens entre la recherche et l'océanographie opérationnelle (animation d'un programme scientifique d'accompagnement) et d'autre part de conseiller Mercator-Océan CORIOLIS et PREVIMER dans leurs choix scientifiques. Notons que le programme d'accompagnement GMMC qui résulte d'un appel d'offre annuel depuis des années, est désormais une des actions du programme National LEFE facilitant la cohérence du GMMC avec les programmes nationaux par une évaluation des projets mieux intégrée.

- Les projets au sein des organismes

Le programme SOAP de la défense (système opérationnel d'analyse et de prévision) a débuté en 1993 par un développement exploratoire aboutissant à une démonstration de concept et à la mise en œuvre d'un premier système de prévision sur la zone du courant des Azores (avec assimilation d'altimétrie temps réel). C'est ainsi qu'un programme en trois phases a été créé, la seconde a conduit en 1998 à étendre la capacité de prévision à l'ensemble de l'Atlantique Nord Est, et enfin la troisième s'appuyant sur Mercator Océan pour la modélisation hauturière, a permis de développer les fonctions nécessaires pour rendre le service attendu par les Forces (dont l'exploitation acoustique des résultats de Mercator)

2.2.3 Les programmes internationaux

- GODAE Ocean View

Au niveau International, GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment) et de son successeur depuis 2008 GODAE OceanView regroupe les principaux acteurs européens mais également les Etats-Unis, le Canada, le Japon, la Chine, l'Australie, l'Inde et le Brésil. GODAE Ocean View a pour objectif principal de permettre et favoriser les échanges scientifiques autour de l'océanographie opérationnelle, par les personnes impliquées dans son développement. La France joue un rôle majeur dans ce programme international. C'est dans ce cadre, en coordination étroite avec le programme CLIVAR d'étude de variabilité du climat du WCRP, qu'a été lancé en particulier Argo, programme international d'observation in situ de l'océan par flotteurs profileurs autonomes, complément indispensable de l'observation spatiale.

- COPERNICUS/GMES

Le programme Européen GMES (Global Monitoring for Environment and Security, nommé depuis peu Copernicus) vise à doter l'Europe de moyens de surveillance de l'environnement, lui permettant ainsi d'évaluer l'impact de ses propres politiques environnementales. C'est ainsi que ce programme s'appuie sur deux volets : l'accès aux observations spatiales (programme des sentinelles de l'ESA) et le développement de services (dont le service marin). C'est ce programme qui a financé les projets ayant permis l'émergence et l'organisation de l'océanographie opérationnelle en Europe (projet Mersea, etc.). C'est dans le contexte de mise en place de services précurseurs que Mercator Océan coordonne le consortium Européen MyOcean, avec l'objectif de mettre en place de façon pérenne la composante monitoring et prévision des services marins en Europe.

- EuroGOOS

EuroGOOS a été fondé en 1994 comme consortium d'agences nationales et d'instituts de recherche ayant pour but de renforcer la coopération et de faciliter l'intégration à l'échelle européenne du développement de l'océanographie opérationnelle en Europe dans le cadre GOOS (Global Ocean Observing System).

Fort de ses 34 membres venant de 16 pays européens, EuroGOOS a depuis fin 2012 entamé la transformation en une entité légale, l'AISBL : (Association Internationale Sans But Lucratif sous la loi belge), qui lui permet de renforcer cette structure de coordination et d'assurer des services pour ses membres. EuroGOOS s'appuie pour les aspects opérationnels sur six Regional Oceanographic Operational Systems (ROOS) couvrant toutes les mers européennes. Ces ROOS ont un spectre d'activités allant de la mise en place et la maintenance des réseaux d'observations in situ à la modélisation côtière opérationnels en passant par la R&D associée et le développement de services avals pour les utilisateurs nationaux. C'est donc tout naturellement que CORIOLIS, Mercator et PREVIMER ont développé des partenariats avec les instituts partenaires d'EuroGOOS et de ses ROOS en particulier en Manche, dans le Golfe de Gascogne et en Méditerranée occidentale.

2.2.4 Les compétences

Au cours des deux décennies passées la communauté française a développé et consolidé une expertise :

- en observation in situ et satellite de la définition des réseaux d'observation à leur traitement en temps réel et temps différé pour répondre aux besoins de l'océanographie opérationnelle et recherche.
- en développement de système de modélisation et d'assimilation du large à la côte basée sur des outils performants et reconnus par la communauté internationale,
- en intégration de systèmes fiables allant de la mise en place et la maintenance de chaînes de production d'informations numériques (ingénierie, passage en opérationnel de méthodes pouvant être développées par la communauté recherche), au support aux utilisateurs (service desk) et à l'expertise afin de garantir la qualité des produits numériques (sortie de modèles ou observations) et d'apporter aux utilisateurs une capacité d'interprétation océanographique des produits numériques : du Produit à l'Information.

3 Bilan scientifique des vingt premières années

3.1 Les fondements scientifiques de l'océanographie opérationnelle : enjeux et défis

L'enjeu scientifique de l'océanographie opérationnelle était de réussir la mise en œuvre d'une approche intégrée combinant l'observation, la modélisation de la circulation océanique et l'assimilation de données afin de produire une description « synoptique » de l'océan turbulent aussi réaliste que possible depuis l'échelle globale jusqu'aux bassins régionaux. L'enjeu consistait en quelque sorte à résoudre de façon efficace le « problème inverse » consistant à inférer la circulation océanique globale à méso-échelle à partir de toutes les observations disponibles.

Pour atteindre cet objectif défini il y a plus de quinze ans, il a été nécessaire de s'attaquer aux défis suivants (i) l'implémentation d'un système d'observations structuré autour de l'altimétrie spatiale et des mesures *in situ* acquises en temps réel dans le cadre des grands programmes internationaux, et bénéficiant d'un traitement aval pertinent en termes de contrôle de qualité et de quantification des erreurs de mesure, (ii) la mise en œuvre de simulations numériques de la circulation utilisant la modélisation aux équations primitives (qui commençait seulement à émerger au début des années 90) et résolvant explicitement la dynamique océanique tourbillonnaire, (iii) le développement de méthodes d'assimilation adaptées aux modèles d'océan à haute résolution, performantes en terme de coût de calcul et compatibles avec un système d'observation bien moins dense que celui de l'atmosphère (iv) la production de réanalyses de qualité scientifiquement reconnues, permettant de reconstituer l'histoire de l'océan dynamique au cours des dernières décennies, (v) la production en routine d'analyses et de prévisions de l'état océanique courant sous l'action des forçages atmosphériques. Il est évident qu'un certain nombre de méthodologies (en assimilation notamment), ont pu être héritées de la prévision numérique du temps ; toutefois de

nombreuses adaptations ont été nécessaires du fait de la nature spécifique du problème inverse océanique. Par ailleurs, la question de l'extension du problème inverse de la physique à la biogéochimie est progressivement apparue comme un enjeu complémentaire au cours des 10 dernières années.

3.2 Avancées marquantes de la recherche et déclinaisons opérationnelles

Est ici présenté un bilan des principales avancées scientifiques qui ont permis d'accompagner le développement de l'océanographie opérationnelle, et des retours dont la recherche a pu bénéficier à partir des développements opérationnels.

3.2.1 Le système d'observations de l'océan : les composantes spatiales et *in situ*

En fournissant pour la première fois une description précise, régulière et globale de la topographie de surface des océans, la série des missions altimétriques de haute précision initiée par Topex-Poséidon a constitué la colonne vertébrale de l'océanographie opérationnelle de première génération, et a fourni un cadre très porteur pour établir à l'échelle internationale un système d'observation dédié au monitoring permanent de l'océan global. Le besoin d'une description fine de l'état physique en 4 dimensions a mis en évidence la nécessité de dimensionner la constellation altimétrique avec un minimum de 3 voire 4 missions en vol pour garantir un échantillonnage spatio-temporel suffisant. La fiabilité des mesures, la dérivation de bilans d'erreur rigoureux, de même que la qualité des traitements requis pour la production de jeux de données intercalibrées multi-missions (temps-réel ou différé) dans la cadre de SSALTO/DUACS, constituent un succès incontestable qui a bénéficié tant à l'océanographie opérationnelle qu'à la recherche sur la variabilité climatique de l'océan. Le besoin d'une information complémentaire pour décrire l'état physique de sub-surface s'est concrétisé par le déploiement du réseau ARGO afin de répondre conjointement aux objectifs opérationnels et de recherche sur le climat, complété par d'autres réseaux d'observation *in situ* (OceanSites). Au final, c'est un système d'observations donnant une vision globale et incluant aujourd'hui des observations spatiales du niveau de la mer et courants océaniques (altimétrie, gravimétrie), température de surface (infra-rouge, micro-onde), couleur de l'eau, vents (diffusiométrie, radiométrie), glaces de mer, vagues, rugosité (SAR) et plus récemment salinité de surface, et des observations *in situ* (température, salinité, courants) acquises dans un cadre de coopérations internationales qui a fourni la matière première pour l'assimilation dans les modèles dynamiques.

La structure Coriolis a joué un rôle clé dans le processus en contribuant au déploiement des systèmes *in situ* du domaine hauturier, à la collecte des observations en temps-réel, au traitement et à la génération de produits utilisables directement (e.g. climatologies) ou intégrables aux modèles opérationnels (e.g. bases de données CORA pour les réanalyses). De nouveaux réseaux de mesure *in situ* dédiés au monitoring en temps réel ou différé des traceurs biogéochimiques (fluorescence, oxygène, sels nutritifs) commencent à être déployés incluant des procédures de contrôle de qualité établies de façon concertée au niveau international. Dans le domaine côtier, le système d'observation nécessaire pour l'opérationnel est encore à consolider en s'appuyant notamment sur les capacités des gliders et des radars côtiers HF. Le projet PREVIMER a néanmoins permis le déploiement de nouvelles plateformes de mesures et de développements instrumentaux focalisés sur l'observation de l'hydrologie et de la turbidité.

Les données d'altimétrie, de température de surface, de gravimétrie ainsi que les mesures *in situ* de température et salinité sont actuellement assimilées en routine dans les modèles opérationnels pour les analyses temps réel ou les réanalyses océaniques (voir sections suivantes). Toutefois, il est constaté que certaines grandeurs sont encore actuellement peu utilisées et pourraient apporter une information utile notamment pour la validation des systèmes. C'est en particulier le cas des observations de tension de vent, de glace de mer et de couleur de l'eau qui décrivent les interactions entre l'océan dynamique et les milieux connexes. Par ailleurs il sera indispensable de préparer l'assimilation de nouvelles grandeurs qui marquent une rupture par rapport à la situation actuelle, comme les observations de type image ou à très haute résolution avec l'altimétrie de large fauchée de type SWOT. Des progrès sont également attendus à propos

de la quantification des incertitudes sur les produits diagnostiques dérivés des mesures (tant physiques que biologiques) pour une exploitation optimale dans le cadre de systèmes opérationnels, ainsi que sur la définition de stratégies optimales de déploiement des réseaux *in situ* en synergie avec les missions spatiales.

3.2.2 Modélisation des circulations océaniques

Depuis les années 90, la modélisation dite « aux équations primitives » est devenue le standard qui a permis la représentation d'une grande variété de régimes dynamiques rencontrés dans l'océan global, bien au-delà du régime quasi-géostrophique. Par ailleurs, l'omniprésence des tourbillons de moyenne échelle révélée par les satellites altimétriques a conduit au développement de modèles de circulation « eddy-permitting » de l'océan global, i.e. intégrant l'effet des tourbillons sur l'état océanique moyen, sur la structuration des grands courants (notamment les courants de bord ouest comme le Gulf Stream) et la représentation des masses d'eau. De façon générale, les avancées vers une simulation explicite de la méso-échelle, rendues possible grâce à l'augmentation de la puissance de calcul et conjuguées au raffinement de paramétrisations physiques (turbulence, convection, courants de gravité, ondes internes, marée), ont directement bénéficié à la mise en œuvre de l'océanographie opérationnelle hauturière. Des adaptations spécifiques ont été développées pour la modélisation côtière, portant notamment sur la formulation non-linéaire de la surface libre et des effets de friction de fond, la représentation de topographies abruptes et l'intégration de la marée. Néanmoins, les modèles actuels restent soumis à l'hypothèse hydrostatique. La paramétrisation de la convection profonde et de la turbulence dans la couche de mélange, qui est critique pour les échanges océan/atmosphère et la biologie, reste pour l'essentiel basée sur les concepts assez conventionnels proposés au début des années 90.

Du point de vue de la résolution numérique, les codes mis en œuvre sont très majoritairement basés sur des méthodes aux différences finies ce qui implique l'utilisation de grilles structurées sur l'horizontale, alors que la prise en compte de géométries complexes à proximité des côtes suggérerait des approches plus flexibles comme celle des éléments finis, les efforts entrepris par certains groupes internationaux dans cette direction ayant été peu relayés au niveau national. En revanche, différents types de coordonnées verticales (géo-potentielle, sigma, hybrides) sont à présent maîtrisées, avec des adaptations originales notamment pour la modélisation des régions à forte variation bathymétrique voire même la représentation des zones découvrantes.

L'objectif de la modélisation opérationnelle étant de fournir, en fonction des applications visées, un état physique de référence aussi réaliste que possible avant assimilation de données, les efforts ont principalement porté sur la représentation des couches supérieures océaniques et sur la minimisation des tendances et des biais à grande échelle. Les équipes opérationnelles de Mercator-Océan ont ainsi pu développer, maintenir et améliorer des configurations robustes de résolution croissante (du 2° au 1/36° régional), souvent de concert avec la communauté DRAKKAR qui a joué un rôle central dans cette évolution mais avec un intérêt plus marqué que la communauté opérationnelle pour la variabilité des échelles de temps « courtes » plutôt que « climatique ». Ces configurations hauturières commencent à être couplées en mode « one way » avec des configurations côtières à plus haute résolution développées dans le cadre de PREVIMER. Toutefois, l'amélioration des couplages sur le plan de la cohérence dynamique reste nécessaire pour progresser vers une vision cohérente des circulations du large à la côte.

3.2.3 Interactions entre l'océan dynamique et les milieux connexes

L'océanographie opérationnelle a favorisé la prise de conscience du besoin d'intégrer progressivement les interactions dynamiques entre l'océan et les milieux qui lui sont connexes afin de décrire de façon réaliste l'océan à fine échelle spatiale ainsi que son évolution depuis la journée jusqu'aux variations décennales. Ce besoin amène à considérer de façon plus particulière les interfaces entre l'océan, l'atmosphère et les surfaces continentales. Les avancées dans ce domaine se sont souvent faites en lien étroit avec les attendus des différents domaines applicatifs.

