

Prospective Scientifique Océanographie Opérationnelle

La prospective scientifique de l'océanographie opérationnelle a donné lieu au rapport provisoire ci-après 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 de la prospective et vous sollicitons pour l'étape N°3

1. ETAPE 1 – OCTOBRE 2012-AVRIL 2013: CONSULTATION DE LA COMMUNAUTE

Consultation des communautés scientifiques recherche et opérationnelle lors d'une journée de préparation au CNES (Octobre 2012), 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, qui 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 Brasseur, 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: REVUE DU RAPPORT PAR LA COMMUNAUTE

Diffusion de la version provisoire du rapport à la communauté scientifique pour revue, 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 jugez 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 après revue par la communauté scientifique. 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 16/07/2013

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.

La plupart des modélisations de la dynamique océanique intégrant l'effet des tourbillons sont aujourd'hui réalisées en prescrivant l'évolution de l'état atmosphérique indépendamment de celui de l'océan. A l'échelle globale comme à l'échelle locale, cette approche de modèle océanique « forcé » pose des problèmes de cohérence entre les milieux en interaction, et cette simplification est une des principales sources d'erreur de l'estimation de l'état de l'océan et de sa variabilité. De plus, en milieu côtier, la faible résolution des produits atmosphériques limite la qualité de l'estimation (effets orographiques locaux, etc). Dans le cas d'événements particuliers (cyclones, événements cévenols), la rétroaction de l'océan sur l'atmosphère est essentielle pour produire des prévisions de qualité. Quelques travaux exploratoires ont montré que différentes approches complémentaires (paramétrisations améliorées des flux air-mer, couplage faible, couplage fort, assimilation) pourraient être envisagées pour améliorer la cohérence entre les 2 milieux. Parmi celles-ci, la prise en compte de l'état de mer sur les échanges de chaleur et de quantité de mouvement est un aspect important qui a déjà fait l'objet de développements novateurs, mettant en évidence le besoin d'une intégration plus poussée entre les efforts de modélisation des vagues, de l'atmosphère et des courants marins. En zone côtière, un défi majeur est posé par la forte variabilité spatiale des forçages (vents et courants) et l'hétérogénéité du fond marin. Une partie de ce défi a été relevé dans le cadre de PREVIMER, donnant lieu à divers développements allant jusqu'au stade opérationnel.

Aux latitudes élevées, la modélisation de la glace de mer s'est imposée dans les modèles globaux dès les années 2000. Toutefois, les formulations thermodynamiques en usage opérationnel sont encore assez rudimentaires (rhéologies élastique-visco-plastiques) mais des modèles plus sophistiqués, actuellement en cours de développement scientifique, permettront d'aborder certains grands défis comme l'évolution future de l'océan Arctique.

Enfin les apports continentaux et leurs influences sur l'océan côtier sont pressentis comme des ingrédients scientifiques essentiels de l'océanographie opérationnelle qui inclura à terme le domaine côtier/littoral. Il s'agit d'un domaine encore insuffisamment couvert pas notre communauté qui nécessitera de renforcer au niveau national les synergies entre les communautés océan/atmosphère d'une part, et surfaces continentales d'autre part.

3.2.4 Extension à la biogéochimie marine

Bien que la modélisation de la biogéochimie et des écosystèmes marins fasse encore l'objet d'études très fondamentales tant au niveau global que régional, la période récente est apparue comme le moment opportun pour entreprendre la transition opérationnelle de la physique au vivant. Les perspectives d'application et les attendus sont nombreux à la fois dans une optique de gestion raisonnée et durable des ressources halieutiques, d'études de scénarios à long terme, de surveillance de la qualité environnementale du milieu ou encore d'estimation quantitative de la composante océanique du cycle du carbone. Il apparaît néanmoins que, si des modèles biogéochimiques relativement généralistes centrés sur le cycle du carbone, de l'oxygène et des principaux éléments nutritifs sont satisfaisants pour l'océan ouvert, les problématiques d'intérêt pour les mers côtières requerront le développement d'approches beaucoup plus spécifiques (par exemple le couplage avec les niveaux trophiques supérieurs et les sédiments, l'ajout d'espèces sensibles toxiques, la modélisation de la dispersion larvaire) en fonction des applications visées.

Les activités de modélisation biogéochimique à Mercator se sont développées grâce à plusieurs projets fédérateurs (Bionuts, Mercator-Vert) qui ont conduit à retenir le modèle PISCES comme outil de base pour le développement de la filière hauturière de l'« océan vert ». Des travaux ont également été entrepris au niveau côtier, notamment dans le cadre de PREVIMER avec le modèle ECO-MARS3D en lien étroit avec les équipes de recherche utilisant ce code. La stratégie suivie consiste à utiliser les champs physiques issus des chaînes de production opérationnelles (analyses temps réel ou réanalyses) pour simuler les interactions biogéochimiques. Il faut ici souligner le rôle très stimulant de l'opérationnel qui, pour la première fois, a conduit la communauté scientifique à envisager des simulations de la biogéochimie

intégrant l'effet des tourbillons à échelle globale. Le choix de PISCES, de même que l'expertise acquise autour de cet outil largement partagé au sein de la communauté nationale, fondent le développement de cette activité pour les années futures et soulignent la nécessité d'une organisation permettant d'assurer la maintenance de PISCES et son évolution sur le long terme.

Le retour d'expérience de cette première étape doit encore être affiné, notamment au sujet des fréquences et résolutions optimales de forçages. Il a néanmoins été souligné l'importance de la physique verticale en tant que « révélateur » des aspects perfectibles de la dynamique des couches superficielles. En particulier, la représentation de la physique sous-maille dans les solutions assimilées est apparue comme un verrou commun à plusieurs groupes investiguant ces questions au niveau international (au sein de la task team GODAE notamment). Enfin, il n'existe pas encore d'assimilation de données biogéochimiques (produits de couleur de l'eau, mesures in situ de type BioArgo) pour la production opérationnelle, mais les premières démonstrations menées en mode recherche encouragent à poursuivre cette voie en lien avec les futures missions spatiales de couleur de l'eau.

3.2.5 Assimilation de données

Le cadre méthodologique de l'assimilation a été établi voici plus de 20 ans et repose sur les concepts généraux d'estimation statistique et de contrôle optimal. Un défi particulièrement critique pour l'océanographie a été de rendre ces méthodes applicables à des systèmes de très grande dimension, de façon à permettre une description de l'écoulement océanique cohérente avec les observations de la circulation à méso-échelle. Le concept de réduction d'ordre combiné aux méthodes d'estimation statistique a permis d'atteindre cet objectif, donnant lieu à des diverses formes de filtres de Kalman de rang réduit comme le SEEK ou l'EnKF. Ces méthodes ont été étendues à l'estimation conjointe de l'état et des paramètres incertains des modèles. La communauté nationale a été particulièrement active dans ce domaine et a joué un rôle leader dans le cadre international GODAE, tout en assurant un transfert effectif des résultats de la recherche vers les applications opérationnelles. En parallèle, des méthodes variationnelles de type 4D-VAR ont été développées, mais la question de leur coût élevé n'a, jusqu'à présent, pas permis leur mise en œuvre pour le contrôle de la circulation océanique à méso-échelle dans des configurations globales.

Dans le cadre de Mercator-Océan, l'approche initiale d'interpolation optimale a été progressivement remplacée par une version simplifiée du filtre SEEK qui omet l'évolution des statistiques d'erreur en fonction de l'écoulement. La pertinence de cette approche en base fixe a été démontrée à la fois pour le contrôle de la physique et de l'état biogéochimique de l'océan. Dans le domaine côtier, la mise en œuvre de l'assimilation n'est pas encore effective dans les chaînes opérationnelles, mais l'exploration des méthodes d'ensemble semble la voie la plus pertinente pour le futur. La question de l'utilisation de l'assimilation de données pour permettre des couplages plus effectifs entre modèles imbriqués hauturier et côtiers est restée pour l'instant au stade exploratoire.

Très récemment, des approches hybrides de type EnVAR (méthodes ensemblistes variationnelles sans adjoint) ont commencé à se développer. Cette tendance est en partie une conséquence de la difficulté de maintenir une version du code linéaire tangent (et de son adjoint) en phase avec les évolutions permanentes du code direct. Elle est également liée à la nécessité de se tourner vers des méthodes d'assimilation qui soient mieux adaptées aux architectures massivement parallèles des futurs calculateurs. Ces méthodes hybrides semblent a priori très prometteuses et bien adaptées au contexte opérationnel, du fait de l'évolution constante des composantes des systèmes d'assimilation (modélisation, observations, erreurs), et du besoin de quantification de l'incertitude des analyses.

3.2.6 Systèmes intégrés

Le concept de « système intégré » est à la base de la vision promue dans le cadre de l'expérience internationale GODAE et constitue aujourd'hui le cœur de métier des équipes nationales d'océanographie opérationnelle. Son principe repose sur l'utilisation conjointe d'observations, de modèles dynamiques, d'incertitudes quantifiées et de méthodes d'optimalité pour assimiler l'ensemble des informations disponibles. La qualité de l'intégration dépend intimement de l'équilibre et de la cohérence entre les différentes sources d'information, et non de la qualité individuelle de chacune de ses composantes (principe d'optimalité).

Dans le cadre de Mercator, un ensemble de « systèmes intégrés » destinés à analyser et prévoir l'état de l'océan, de la glace de mer et de la biogéochimie marine à haute résolution a été bâti de façon cohérente à partir du même modèle numérique (NEMO en configuration ORCA), des mêmes forçages atmosphériques (ECMWF) et de la même méthode d'assimilation (SAM2) pour intégrer les données satellitaires et *in situ* acquises en temps réel ou en temps différé. Ces systèmes intègrent un héritage très substantiel de connaissances scientifiques et d'expertise technique acquise au cours des 15 dernières années, offrant un large potentiel de valorisation pour le progrès des connaissances sur l'océan au cours des prochaines décennies.

La couverture de l'océan hauturier est actuellement assurée par un système à haute résolution (global 1/12°) qui vise principalement à minimiser l'erreur de modélisation. Le choix de la haute résolution a eu pour conséquence la mise en œuvre d'une assimilation « à bas coût » qui ne permet qu'une exploitation sub-optimale des données assimilées. Il conviendra dans le futur de veiller à ce que les choix faits au niveau de la conception des systèmes intégrés privilégient la qualité globale des produits en permettant le cas échéant l'utilisation de méthodes d'assimilation plus performantes même si cela doit se faire au détriment de la modélisation. Dans le domaine régional ou côtier, les systèmes opérationnels en place dans le cadre PREVIMER ne comportent pas encore de composante d'assimilation : le concept de système intégré pour le côtier reste donc à inventer, en fonction notamment de ce que sera le système d'observation, les couplages avec l'atmosphère et les apports continentaux, l'imbrication dans les systèmes hauturiers et des applications visées.

3.2.7 Réanalyses

Les réanalyses océaniques constituent un des produits les plus emblématiques de l'océanographie opérationnelle contemporaine, dont la production à partir des systèmes intégrés n'aurait pas été possible sans une coopération étroite entre océanographes, ingénieurs, mathématiciens et informaticiens. La France fait notamment figure de leader pour la production de réanalyses océaniques à haute résolution, se démarquant ainsi des reconstitutions climatiques à plus basse résolution produites par d'autres communautés (aux US notamment avec le consortium ECCO). Les réanalyses ont fait l'objet d'un effort de coordination et d'évaluation important au niveau international dans le cadre des programmes CLIVAR et GODAE auxquels la France a apporté une contribution essentielle. Depuis 2008, le projet national GLORYS a permis de fédérer autour de Mercator et de Coriolis les compétences nécessaires pour concevoir, produire, valider et exploiter les réanalyses océaniques de l'océan global couvrant la période 1992-2010. On peut ainsi constater que les réanalyses figurent aujourd'hui parmi les produits de l'océanographie opérationnelle les plus utilisés par les équipes de recherche. Au travers de celles-ci, la communauté dispose aujourd'hui d'un moyen unique pour décrire la variabilité océanique depuis le début de l'ère altimétrique, la structure des masses d'eau et des courants.

Les méthodologies mises en place pour la physique ont commencé à être adaptées à la production de réanalyses de l'état biogéochimique de l'océan, avec notamment les simulations globales BIOMER utilisant le modèle PISCES, ainsi qu'un démonstrateur permettant l'assimilation de couleur de l'eau sur l'Atlantique Nord. Un enjeu pour le futur sera de transposer le concept de réanalyse à l'échelle régionale

(Mer Méditerranée, région IBI), en y intégrant des spécificités propres en termes de systèmes d'observation et d'échelles dynamiques à résoudre. La question de la cohérence dynamique en espace et en temps des champs produits reste aujourd'hui non entièrement résolue ce qui limite le champ d'exploitation possible pour certaines études climatiques (variabilité de la MOC) ou de représentation des échanges verticaux (couplage avec la biologie).

3.2.8 Capacités de focus spatio-temporel

Cette notion fait référence au déploiement de systèmes « sur mesure » pour répondre à des problèmes spécifiques, localisés dans le temps et dans l'espace. Il s'agit généralement de situations de crise qui exigent une certaine souplesse et rapidité dans la mise en œuvre du dispositif pour lequel la focalisation à très haute résolution spatiale et temporelle est particulièrement importante. Les différentes composantes d'un système intégré (modèles/observations/assimilation) sont généralement au cœur du dispositif. Se greffent autour des modules divers (biogéochimie, chimie, radioéléments, module halieutique) en fonction des utilisateurs amenés à utiliser les produits de ces systèmes.

De telles capacités ont été développées et mises en œuvre ces dernières années par le SHOM, l'Ifremer, Météo-France et Mercator afin de répondre aux besoins de la défense, de suivi de pollutions (accident de la centrale nucléaire de Fukushima), de conséquences accidentelles (vol Air-France 447) ou d'aléa climatique (tempête Xynthia). Plusieurs de ces systèmes s'appuient sur le logiciel AGRIF pour atteindre localement la résolution requise à partir des informations fournies à plus grande échelle par les systèmes génériques. Les diverses expériences de déploiement menées en vraie grandeur ces dernières années ont montré que la qualité du downscaling était étroitement tributaire des techniques numériques utilisées mais aussi de la disponibilité des jeux de données spécifiques (bathymétrie, forçages aux frontières, atmosphère) qui sont nécessaires pour tirer pleinement parti de la très haute résolution.

3.2.9 Outils numériques

Il est évident que la question du choix des outils numériques a conditionné de façon très sensible les modalités d'interactions entre les communautés scientifiques et opérationnelles. On peut distinguer 3 catégories d'outils selon leur degré de partage entre les 2 communautés : (i) des outils communautaires comme NEMO et leurs composantes élémentaires (AGRIF, LIM, PISCES etc.) adoptés très largement à l'échelle nationale et européenne et faisant l'objet de développements scientifiques permanents, (ii) des outils partagés entre les 2 communautés mais développés à échelle plus réduite comme ECO-MARS3D, pour lesquels l'effort de R&D peut rapidement s'avérer sous-critique, et (iii) des outils peu ou pas développés au plan national en dehors du périmètre opérationnel comme le modèle de circulation HYCOM ou le logiciel d'assimilation SAM-2.

De façon générale, on constate que l'adoption d'un même outil numérique par les communautés recherche et opérationnelle a pu se traduire par un processus d'enrichissement mutuel très vertueux, et par une accélération des transferts des résultats de la recherche vers les applications. C'est évident dans le cas de la modélisation dynamique avec NEMO, autour duquel Mercator a choisi de bâtir une stratégie long-terme très concertée avec la communauté recherche nationale et européenne (via les partenaires du consortium NEMO), alors qu'à l'inverse des outils comme SAM-2 (développé en propre par Mercator) auront du mal à rester au niveau de l'état de l'art très longtemps. D'autres outils comme PALM retenus initialement dans les systèmes d'assimilation Mercator se sont finalement révélés inadaptés à la réalité actuelle des chaînes opérationnelles. Il est donc essentiel d'encourager les interactions de chacun des acteurs autour d'outils communautaires existants, sans nécessairement viser la convergence vers un outil unique mais en ayant conscience de la réalité des forces disponibles au niveau national pour maintenir le meilleur niveau de l'état de l'art. Des initiatives ont ainsi vu le jour, avec notamment le projet national COMODO centré sur le développement conjoint des outils de modélisation dynamique, et le projet européen SANGOMA qui vise à créer un ensemble cohérent d'outils d'assimilation interfaçables et

évalués au travers de benchmarks dédiés. Ces projets ont permis de démontrer les bénéfices d'un partage d'un maximum de conventions (e.g. formats de fichiers) et de modules/librairies, et ont souligné le besoin d'améliorer les interactions au quotidien entre chercheurs et ingénieurs qui développent ces outils.

3.3 Mécanismes et instruments programmatiques de transfert de la recherche aux applications

La plupart des avancées scientifiques identifiées précédemment doivent beaucoup au lien étroit établi *ab initio* entre la communauté scientifique et opérationnelle. La création du GdR sur l'assimilation de données en météorologie et océanographie au début des années 90, son renouvellement, puis la création du GMMC en 1999 et plus tard du programme ASSIM de LEFE (prolongé aujourd'hui avec l'action MANU) ont joué un rôle déterminant dans la dynamique de cette communauté et les enrichissements mutuels entre océanographes, atmosphériciens et mathématiciens.

Plus spécifiquement, le GMMC est l'instrument programmatique mis en place par les organismes partenaires de Mercator et Coriolis qui a rendu possible:

- la structuration grâce aux PPRs (Projets en Partenariat Renforcé) d'actions de recherche stratégiques sur l'océan hauturier (DRAKKAR, GLORYS, assimilation variationnelle, Mercator-Vert) associant dans la durée plusieurs laboratoires avec des équipes de R&D de Mercator et de Coriolis ; les PPRs sont aujourd'hui les seuls instruments qui permettent un soutien « long terme » (+ de trois ans) de coopérations stratégiques associant les divers acteurs de la communauté ;
- des développements et échanges scientifiques fructueux autour d'activités de recherche appliquée, non nécessairement pilotées par des questions scientifiques mais considérés comme scientifiquement légitimes ; le CNES/TOSCA a également joué un rôle important dans ce processus, mais peut-être avec une coordination trop lâche vis-à-vis du GMMC.
- le transfert de compétences scientifiques (plusieurs CDI formés dans les laboratoires) vers les équipes opérationnelles, rendu nécessaire pour pérenniser le savoir-faire en R&D de Mercator, aujourd'hui très reconnu en France et en Europe ; toutefois, la stabilisation d'ingénieurs sur des compétences critiques à l'interface entre recherche et opérationnels reste un point fragile qu'il faudra considérer pour la suite.
- l'articulation plus récente avec la communauté scientifique plus large, au travers de l'intégration du GMMC en tant que nouvelle action du programme LEFE.

Le Conseil Scientifique a joué un rôle clé dans l'animation de la communauté dans son ensemble, mais n'a probablement pas agi avec suffisamment d'efficacité sur le plan des grandes orientations scientifiques à insuffler en lien avec les programmes internationaux. Ainsi, l'extension du GMMC au côtier est une action qui n'a clairement pas atteint ses objectifs, et par ailleurs le mécanisme d'appel d'offre a plutôt tendance à s'essouffler. D'autre part, le rôle structurant des PPRs n'influe pas encore de façon très efficace les actions de programmation de l'ANR, ni les orientations des contenus des programmes de R&D européens (PCRD, GMES). En conclusion, on doit s'interroger sur la façon de maintenir une articulation recherche/opérationnel propice à ces transferts, en particulier dans un contexte où plusieurs organismes (Ifremer, Météo-France, SHOM) souhaitent désormais s'affirmer de façon plus concrète en tant qu'acteurs de l'opérationnel.

3.4 Forces et faiblesses identifiées

Au final, les principales forces et faiblesses de notre démarche au cours des 20 dernières années, et du positionnement national actuel sont identifiées comme suit :

Forces :

- Héritage d'une vision scientifique de l'océan turbulent en phase avec les missions spatiales, et qui soulève de nouveaux questionnements scientifiques; cette vision se prolonge actuellement vers les plus petites échelles avec notamment la mission SWOT envisagée pour 2020;

- Positionnement unique sur un domaine couvrant toutes les mers du globe, avec la possibilité de faire des zooms en régional/côtier au-delà de la ZEE métropolitaine ainsi qu'en plein océan; ce positionnement sur le global ouvre des perspectives très riches pour l'étude du climat et sa régionalisation à toutes les latitudes ;
- Culture opérationnelle héritée de la météorologie opérationnelle et qui trouve ses racines dans le GDR assimilation en météorologie/océanographie des années 90 ; reconnaissance du rôle leader de la France en assimilation qu'il est important de préserver conjointement avec la communauté météo ;
- Force de proposition pour des concepts scientifiques nouveaux qui ont percolé jusqu' au niveau international avec GODAE, avec par exemple le concept de réanalyses océaniques et d'approche intégrée pour la biogéochimie et les écosystèmes marins, le concept de validation via les métriques GODAE gagnerait à être enrichi par la communauté recherche ;
- Lien étroit et fructueux entre communautés recherche opérationnelles : transferts efficaces de résultats voulus par les chercheurs *ab initio*, et bénéficiant des retours de l'opérationnel.

Faiblesses :

- Un système d'observations nécessairement tributaire d'éléments non maîtrisés (notamment pour le global), tant au niveau des agences spatiales que des contributeurs nationaux pour la composante in situ qui reste fragile et qui nécessite une meilleure structuration pour le contrôle de qualité en temps différé;
- Une infrastructure de codes numériques encore inachevée, composées de différents codes dont la compatibilité et la complémentarité scientifique n'est pas encore optimale ;
- Un système d'observations clairement moins riche qu'en météo, et de surcroît insuffisamment pris en compte (certains paramètres étant encore peu ou mal assimilés);
- Des produits de réanalyses dont l'exploitation scientifique pour les études de climat reste encore bridée par leur manque de cohérence dynamique : ceci tient à la fois à une distribution spatio-temporelle hétérogène des observations, aux modèles (forçages) et aux méthodes d'assimilation;
- Des objectifs insuffisamment définis pour les applications biogéochimiques, qui se traduisent par un manque de fil directeur pour le développement de la filière biogéochimique;
- Un retard à rattraper pour l'océanographie côtière opérationnelle par rapport à l'océan hauturier, nécessitant un interfaçage mieux construit et plus continu du large à la côte;
- Un cloisonnement encore trop marqué au niveau des métiers (les chercheurs n'investissent pas suffisamment les centres opérationnels, tandis que les personnels opérationnels restent trop exclusivement mobilisés sur les priorités « court terme »).

3.5 Ce qu'on en retient

Observations : l'océanographie opérationnelle a contribué de façon déterminante au fait que l'océan soit bien mieux observé aujourd'hui qu'hier, au bénéfice mutuel de la science et des applications.

Modélisation dynamique : l'objectif aujourd'hui atteint d'une modélisation eddy-permitting de l'océan hauturier rend désormais possible la transition vers un océan pleinement eddy-resolving du large à la côte.

Assimilation : l'arrivée à maturité des méthodes d'assimilation ensemblistes permet d'envisager sereinement le déploiement de systèmes opérationnels capables de produire des estimations océaniques assorties d'incertitudes quantifiées.

Couplages : les interactions entre l'océan dynamique et ses milieux connexes est un domaine scientifique dont la montée en puissance occupera une place centrale dans les développements futurs.

Intégration/réanalyses : les réanalyses océaniques sont le produit emblématique au travers duquel les systèmes opérationnels apportent une matière nouvelle pour l'analyse scientifique ; le concept est encore à préciser en milieu côtier.

Biogéochimie : l'extension de l'approche intégrée au domaine du vivant constitue le prochain défi scientifique à organiser.

Outils : les outils numériques constituent la clé de voûte recherche/opérationnel dont il faudra poursuivre la consolidation au travers d'efforts communautaires partagés.

4 Contexte de développement sur les 10 ans à venir

4.1 Les enjeux liés à l'océanographie opérationnelle, et les attentes des utilisateurs et des financeurs

Les systèmes d'OO vont devoir répondre à des demandes sociétales croissantes sur la description et la prévision de l'état physique, biogéochimique et des écosystèmes de l'océan du large à la côte, l'analyse rétrospective et les études de scénarios. L'enjeu stratégique à moyen terme est la mise en place et la pérennité d'un service opérationnel d'intérêt général d'analyse et de prévision de l'océan allant du large à la côte.

Ces systèmes doivent permettre de répondre aux besoins des politiques maritimes et littorales dans les domaines de l'environnement, de la gestion des ressources, de l'aménagement du territoire, la santé, la sécurité publique et la sûreté, la défense, la recherche, etc.

En outre, ils doivent permettre de consolider, développer ou susciter l'émergence d'applications dans le secteur privé à destination des usagers du domaine maritime. Ces usagers ont des attentes fortes concernant la description et la prévision de la mer afin de sécuriser leurs activités et d'en optimiser le coût. La diversification des usages, dont les développements des énergies marines renouvelables et de l'aquaculture, accroît le besoin d'analyses et de prévisions fiables, tout autant sur les milieux physiques que biologiques. La surveillance de l'environnement va devoir, en particulier, considérablement s'étendre dans le cadre de la DCSMM ; l'océanographie opérationnelle peut et doit fournir des outils d'une surveillance intégrée (in-situ, satellite, modélisation) de demain en complément des observations in-situ. L'actualité récente (e.g. tempête Xynthia, algues vertes en Bretagne, pollution hydrocarbures dans le Golfe du Mexique, contamination radioactive en mer due à l'accident de Fukushima) rappelle bien que des capacités d'analyse et de prévision de l'océan du large à la côte sont nécessaires aux services de l'Etat en charge de la gestion et de la prévision des risques.

4.2 Les enjeux scientifiques liés à cette discipline

L'océanographie opérationnelle fournit une description intégrée (observations satellites et in-situ, modèles) de l'état physique et biogéochimique de l'océan qui est indispensable à la recherche. Un axe majeur de recherche reste la caractérisation, la compréhension et la prévision du changement climatique aux échelles globales et régionales. Le développement de la prévision décennale et le rôle de l'océan profond sont des sujets nouveaux qui pourront fortement bénéficier de la disponibilité de réanalyses océaniques issues des systèmes opérationnels. Néanmoins l'analyse régulière des sorties des systèmes temps réel et la confrontation aux observations nourrit également de nouvelles questions de recherche. Les systèmes temps réel sont aussi utiles pour la réalisation de campagnes océanographiques.

Les enjeux scientifiques en océanographie (voir prospective océan/atmosphère 2011-2016 conduite par l'INSU) sont multiples et incluent l'étude des interactions océan/glace/atmosphère, la compréhension des cycles biogéochimiques et du fonctionnement des écosystèmes, la très haute résolution océanique (sub-mésos-échelle) et les couplages physique/biologie, l'étude de la dynamique côtière incluant notamment les couplages avec l'atmosphère, les vagues, la sédimentologie et les écosystèmes, l'assimilation de données, l'étude sur la prévisibilité de l'océan aux différentes échelles. La modélisation biogéochimique et des écosystèmes fournit aujourd'hui des réponses pertinentes à certaines questions environnementales (e.g. eutrophisation, origine des pollutions, marées vertes) ; l'amélioration des modèles reste un axe majeur de recherche afin notamment d'évoluer vers la modélisation des échelons trophiques plus élevés, de contraindre les modèles par des techniques évoluées d'assimilation (e.g. contraintes de paramètres) et de prendre en compte la modélisation des apports des bassins versants. Ces aspects sont essentiels pour la problématique de la surveillance environnementale.

L'océanographie opérationnelle bénéficiera largement des avancées importantes de la recherche dans ces domaines. Elle devra être un véritable partenaire de la recherche pour répondre à ces enjeux, en adoptant des pratiques de coopération qui aient un fort effet de levier sur la mise place et la réalisation des projets scientifiques portés par la communauté recherche et permettent d'accélérer les cycles d'innovation.

L'océanographie opérationnelle devra aussi répondre aux attentes des Chantiers Méditerranée et Arctique qui vont fortement mobiliser la communauté scientifique dans les 10 années à venir.

4.3 A propos des infrastructures, à propos de GMES/Copernicus et des programmes internationaux

Les systèmes d'OO doivent s'appuyer sur des moyens d'observation satellite et in-situ pérennes et des capacités de traitement temps réel et temps différé de ces observations. La contribution des satellites est essentielle (niveau de la mer et courants géostrophiques, couleur de l'océan, température de surface, salinité de surface, état de la mer et vents, glaces de mer). Pour les 10 à 15 années à venir, l'état de la constellation altimétrique devrait s'améliorer avec les missions Alti-Ka, Sentinelles 3A et 3B, Jason-3 et Jason-CS. Des performances accrues sont attendues grâce à l'utilisation d'un mode SAR along track. Les améliorations de la connaissance du géoïde à petite échelle (GOCE) devraient avoir un impact majeur sur les systèmes d'assimilation. A partir de 2020, la mission SWOT (NASA/CNES) va permettre pour la première fois d'observer le niveau de la mer avec une résolution kilométrique. Un des enjeux pour l'océanographie opérationnelle sera de se préparer à l'utilisation de ces nouvelles données. De nouvelles missions pour la SST (e.g. GCOM, NPOESS/NPP, S3) sont prévues et il faudra tirer un meilleur avantage de la couverture en données SST et des produits développés dans le cadre du GHRSSST. En particulier, l'assimilation des données SST à haute fréquence temporelle doit permettre de mieux contraindre la variabilité de la couche de mélange océanique dans les modèles. L'évolution des algorithmes de traitement de la couleur de l'océan devrait permettre à terme de discriminer les espèces phytoplanctoniques et d'observer de façon plus quantitative la Chl-a et les Matières en Suspension Minérales dans les zones côtières. Il faudra utiliser au mieux ces capacités d'observation pour contraindre les modèles. Le CNES étudie par ailleurs un projet d'un satellite géostationnaire permettant une observation à haute fréquence de la couleur de l'océan dans les mers européennes (OCAPI). L'impact pour l'océanographie opérationnelle française et européenne serait indéniable. Au niveau des vagues, CFOSAT (CNES en coopération avec la Chine) devrait donner dès 2014 une mesure globale et précise des vagues à la surface des océans. Les missions SMOS et Aquarius devraient continuer d'observer la salinité de surface et des améliorations significatives des algorithmes de traitement sont attendues. Les centres de traitement de façon générale devraient être renforcés et de nouveaux produits seront progressivement proposés (e.g. SSALTO/DUACS, OSI SAF, CATDS, CERSAT, TACs MyOcean).

L'observation in-situ systématique aux échelles globales, régionales et côtières doit parallèlement être consolidée et renforcée notamment pour les mesures biogéochimiques et pour le côtier. Le programme international GOOS vient de se restructurer et a pour objectif de renforcer l'observation des océans et de mettre en œuvre les recommandations de la conférence OceanObs09 avec une extension de la physique vers la biogéochimie et la biologie. Le programme international Argo définit sa nouvelle phase avec une extension à la biogéochimie (oxygène, Chl-a, nitrate, carbone particulaire), à l'océan profond, aux zones polaires et aux mers marginales. Le développement d'infrastructures de recherche européenne et la priorité affichée dans le programme Horizon 2020 de l'Europe doit permettre de consolider certains moyens d'observations essentiels pour l'océanographie opérationnelle : Euro-Argo et sa nouvelle structure ERIC pour Argo, le projet GROOM pour les gliders, JERICO pour les observations côtières. La structuration d'EuroGOOS doit aussi être permettre d'améliorer la coordination européenne des réseaux régionaux. Les centres de traitement seront renforcés via notamment l'in situ TAC de MyOcean et le programme EMODNET.

L'océanographie opérationnelle va fortement évoluer au niveau européen avec le démarrage de la phase opérationnelle du programme GMES/Copernicus. C'est une opportunité unique. Le Marine Service de Copernicus développé dans le cadre des projets MyOcean-I&II sera renforcé avec la mise en place d'un

centre distribué géographiquement d'océanographie opérationnelle (ECOMF). Au niveau international, la coordination de l'océanographie opérationnelle devrait continuer d'être assurée par GODAE OceanView et JCOMM en liaison avec GOOS.

4.4 A propos des Mercator Océan, Coriolis et Previmer

Il est essentiel de consolider Mercator Océan dans son rôle de coordination et de mise en œuvre du service européen d'océanographie opérationnelle (Copernicus Marine Service) et de réussir l'océanographie opérationnelle européenne (ECOMF). Coriolis devra aussi renforcer son positionnement européen comme coordinateur du service européen in situ du Copernicus Marine Service. Il est parallèlement stratégique de structurer en aval du service européen, un service national d'océanographie opérationnelle autour de Mercator Ocean, Previmer et Coriolis pour organiser les contributions nationales, répondre aux besoins des utilisateurs nationaux et être un prescripteur / interlocuteur du service européen. Ce service national organisera en relation avec les utilisateurs institutionnels des services dédiés vers les applications. Il s'appuiera sur l'offre européenne qui sera complétée selon les besoins et devra notamment inclure une composante côtière (OCO) allant jusqu'à la côte et couvrant les trois façades métropolitaines (Manche, Atlantique, Méditerranée) avec une extension progressive aux zones maritimes d'Outre-Mer. Etendre les capacités actuelles à la côte où les besoins sociétaux, économiques et des politiques publiques sont les plus forts est donc à la fois nécessaire et stratégique pour la France. Des initiatives similaires sont en cours dans les grandes nations maritimes (e.g. Etats Unis, Royaume-Uni, Italie, Australie).

Mercator Ocean va organiser sa contribution à une nouvelle structure européenne (ECOMF) et devra expliciter ce qui relève d'une mission européenne et d'une mission nationale. Des discussions sont en cours pour préparer l'après Previmer dès 2014. Coriolis revoit aujourd'hui son organisation dans le cadre de la préparation de sa nouvelle convention Coriolis 2014-2020 avec la prise en compte de cette mission européenne, un lien renforcé avec les Services d'Observation et les SOERE et l'intégration de la composante in situ de l'océanographie côtière opérationnelle.

4.5 Ce qu'on retient : Opportunités et menaces

Les systèmes d'OO vont devoir répondre à des demandes sociétales croissantes sur la description et la prévision de l'état physique, biogéochimique et des écosystèmes de l'océan du large à la côte. La surveillance environnementale et les énergies marines renouvelables sont de nouveaux secteurs d'application de l'OO.

La recherche reste un client important de l'OO, mais cette dernière bénéficie largement des avancées de la recherche dans de nombreux domaines. Des capacités accrues de l'OO et un nouveau paradigme de coopération recherche-opérationnel seront nécessaires pour répondre aux nouvelles questions de recherche.

L'enjeu stratégique à moyen terme est la mise en place et la pérennité d'un service opérationnel d'intérêt général d'analyse et de prévision océanique allant du large à la côte.

La mise en place d'une océanographie opérationnelle européenne (Copernicus Marine Service et ECOMF) est une opportunité unique. Il est tout aussi essentiel de structurer une offre nationale en aval et en complément de l'offre européenne.

5 Prospective scientifique sur les 10 ans à venir

5.1 Des choix nécessaires dans les priorités scientifiques

Deux grandes tendances majeures d'évolution se dessinent pour les systèmes d'Océanographie Opérationnelle actuels. D'une part, il y a une demande croissante d'intégration des systèmes d'OO dans les systèmes de prévisions météorologiques, dans la mesure où la démonstration a été faite que le couplage O/A avait un impact significatif sur la prévision météorologique à moyen terme et saisonnière de phénomènes clés tels que la Madden-Julian Oscillation. Certains centres météorologiques (ECMWF, UKMO, services météorologiques Canadiens, NCEP) se lancent dans la construction et la mise en œuvre des systèmes prévisionnels couplés complets, en se fondant sur les systèmes d'OO existants pour la composante océanique. Certains de ces centres (ECMWF, NCEP) utilisent déjà de tels systèmes pour fournir une description de l'état passé du système couplé (réanalyses couplées O/A à ECMWF, et réanalyses CFSR au NCEP par exemples). D'autre part, les systèmes d'OO vont devoir répondre à des demandes sociétales croissantes très diverses, allant des besoins de la recherche à ceux affichés par les politiques maritimes civiles et militaires, et devront être des outils pertinents tant pour la recherche océanographique et climatique que pour de la gestion des risques. Ils répondront à ces besoins via une description et une prévision de plus en plus complète de l'état physique et biogéochimique des océans et des écosystèmes marins du large à la côte, via des analyses rétrospectives portant sur des périodes et des événements particuliers ou des études de scénarii divers, et via une structuration de moyens parmi lesquels on citera en particulier les bases de données et les systèmes d'observation.

L'OO française a acquis des compétences remarquables dans le développement et la mise en œuvre d'un ensemble de « systèmes intégrés » destinés à analyser et prévoir avec une haute résolution spatiale l'état physique de l'océan hauturier (global et régional) et de la glace de mer. Ces compétences incluent en particulier la maîtrise d'outils avancés de modélisation et d'assimilation, la construction et la gestion de bases de données d'observations de qualité contrôlée et leur mise à disposition en temps réel et en temps différé, et enfin l'expertise des systèmes intégrés. Ces spécificités positionnent l'OO comme un partenaire majeur de la communauté recherche. Ces compétences, reconnues internationalement, lui donnent une identité forte dans la communauté des sciences océaniques et un leadership incontesté dans les instances européennes. L'OO française a également investi dans l'extension de ses compétences vers le domaine côtier afin de donner à son système une complète synergie large-côte. Des efforts ont également été initiés dans le domaine du couplage entre la physique et la biogéochimie marine dans la perspective d'évoluer vers une prise en compte plus complète de l'environnement marin. En conséquence, et dans la perspective de la mise en œuvre d'un système de prévision intégré « Terre » (océan-glace-vagues-atmosphère-continent-biosphère couplé), l'OO définit naturellement son rôle comme celui de l'un opérateur d'excellence de la composante Océan.

La prospective recommande clairement que la voie dans laquelle l'OO doit s'engager dans les 10 ans à venir est de consolider sa dimension "océanographique" en renforçant ses points forts traditionnels (e.g. la physique hauturière), d'étendre son domaine d'excellence opérationnelle au domaine côtier et à l'ensemble des sciences océaniques (biogéochimie, biologie, sédimentologie, halieutique, etc.), et en développant sa capacité à s'interfacer avec des applications dans d'autres domaines où l'océan joue un rôle crucial (par exemples la prévision saisonnière ou la recherche sur le climat).

L'intégration de la biogéochimie dans le système à toutes les échelles (y compris globale) est nécessaire pour plusieurs raisons. On a besoin d'une description régulière, systématique et précise de la biogéochimie marine (ce que permet l'approche intégrée couplée physique/bio) comme socle scientifique de base nécessaire pour apporter des réponses étayées à des questionnements plus complexes (par exemple qualité des eaux, ressources, biodiversité, acidification). On a également besoin de résoudre conjointement la physique et la biogéochimie marine pour dire comment l'océan contribue à la variabilité du climat, notamment au travers de la contribution océanique au cycle du carbone.

Ainsi l'océanographie opérationnelle française se fixe comme objectif à l'horizon 2025 d'être capable de fournir,

- en temps réel ou en temps différé selon les besoins,
- avec une résolution spatio-temporelle pertinente,
- sur un continuum d'échelles comprenant un domaine global correspondant à sa vocation européenne et des domaines régionaux et côtiers d'intérêt national,

des informations (c.à.d. des observations, des analyses, des prévisions à court ou moyen terme, des analyses rétrospectives portant sur des périodes pluri-décennales ou sur des événements particuliers, ...) précises, qualifiées, et cohérentes sur:

- l'état physique des océans (température, salinité, courants, glace de mer, dénivellation de surface, vagues, marées),
- l'état biogéochimique des océans (O₂, pCO₂, nutriments, MES)
- l'état des écosystèmes (Biomasse et espèces phytoplanctoniques, production primaire et production secondaire, ...)

Les informations produites par l'OO devront être pertinentes pour la surveillance à moyen et long termes des propriétés essentielles caractérisant l'évolution du milieu marin. Pour atteindre ces objectifs la prospective recommande une approche scientifique favorisant une intégration cohérente (*seamless*) des échelles et des processus hauturiers, régionaux et côtiers, et une extension du champ des variables essentielles à estimer (jusqu'à présent focalisé sur la physique) à un noyau de bio/géochimie approprié au développement des applications en aval.

L'OO devra également avoir la capacité de déployer sur demande, en cas de crise ou pour des besoins nécessitant des investigations spécifiques:

- des systèmes intégrateurs re-localisables en temps réel ou différé, permettant des descentes d'échelles
- et des systèmes complémentaires d'observation in situ adaptatifs.

L'OO devra également développer des compétences aux interfaces avec d'autres domaines où l'océan soit joue un rôle crucial soit est fortement impacté, mais où elle n'a pas les compétences indispensables à l'excellence requise, afin de lui permettre de contribuer efficacement à des applications dans ces domaines (par exemples la prévision météorologique à moyen terme et saisonnière, la recherche climatique, les réanalyses climatiques du système couplé, les applications spécifiques situées en aval du système dans le domaine littoral ou estuarien, par exemple les évolutions morphologiques, les écosystèmes, etc.). Ces compétences devront avoir été développées dans l'objectif d'établir des partenariats durables avec les communautés d'excellence dans ces domaines.

Atteindre ces objectifs implique un changement de paradigme pour accompagner le développement de l'OO en France. En effet, ce développement s'est jusqu'à présent fondé sur la construction et l'exploitation d'un système et de services. Ce système est maintenant en place, exploité de façon opérationnelle et produit de nombreux services. Les objets auxquels l'OO s'intéresse à l'horizon 2025 (un océan multi-disciplines et multi-échelles et des interfaces avec de nombreux autres domaines, voir encadré ci-dessus) et les outils avancés à développer font apparaître un tel degré de complexité qu'un fonctionnement en partenariat entre les communautés recherche et opérationnelle, qui devront désormais s'appuyer mutuellement l'une sur l'autre, est indispensable.

Le nouveau paradigme qui permettra de décider du choix des problèmes à étudier et des techniques à développer pour accompagner l'OO ne doit pas se focaliser sur le seul développement d'un nouveau système, mais doit se fonder sur un renforcement conséquent des liens Opérationnel/Recherche et des compétences complémentaires de ces communautés, chacun pouvant alors apporter ce qu'il a de meilleur. Cela exigera également une coordination inter-organismes visionnaire.

5.2 Contours et composantes du Futur Système Opérationnel Générique

La réflexion prospective a fait émerger les contours et les caractéristiques principales d'un système d'océanographie opérationnelle intégrateur générique (c.a.d. fournisseur d'information de bases) qui permettra d'atteindre les objectifs définis à l'horizon 2025 (voir encadré précédent). Ce système devra être multi-échelles (représenter un continuum de l'échelle globale aux échelles régionales et côtières), multi-disciplines (physique, biogéochimie, sédimentologie), et avoir des capacités de re-localisation et/ou de mise en œuvre de systèmes spécialisés par application. Il distinguera donc (i) un socle commun constitué d'un système d'observation aussi complet que possible et cohérent avec l'aspect multi-échelles/multi-disciplines du système intégrateur, (ii) un système intégrateur à l'échelle globale (iii) et un système intégrateur d'échelle de bassin ou régionale qui permettront à l'OO française d'affirmer son leadership européen, et (iv) de systèmes côtiers focalisés sur les façades nationales. Ce système générique utilisera des méthodes d'intégration (assimilation) avancées multi-échelles, multi-résolution, des méthodes d'ensemble et probabilistes permettant une évaluation des erreurs d'analyses et de prévision et de l'horizon de prédictibilité. Des adaptations spécifiques de ces méthodes seront mises en œuvre pour les réanalyses qui conserveront une priorité élevée.

Les diverses composantes qui devraient contribuer au système sont présentées ci-après. Certains choix dimensionnant pour le système devront être faits, pour lesquels des études scientifiques seront nécessaires car nous n'avons pas encore d'éléments décisionnels objectifs ou quantitatifs. Les questions scientifiques et techniques à la fois pertinentes pour les objectifs que l'OO se propose d'atteindre en 2025 (voir encadré précédent), et partagées par les deux communautés recherche et opérationnelle sont identifiées. Les chantiers (actions de recherche structurantes, voir une définition en section 5.3) à mettre en œuvre pour répondre à ces questions scientifiques sont également proposés.

5.2.1 Le système d'observation

Le système d'observation devra

- contribuer au maintien des réseaux d'observation (in-situ et spatial) déjà en place et à l'évolution vers ce qu'ils seront en 2025,
- contribuer au développement de nouveaux réseaux dont certains spécifiques aux zones côtières,
- mettre à disposition en temps réel et temps différé (avec un contrôle qualité supérieur) les observations in situ et spatiales nécessaires aux systèmes opérationnels aux différentes échelles traitées et à la recherche.

Le système devra permettre la construction de réanalyses et d'indices pertinents pour le suivi des océans, d'analyses et de prévisions décrivant l'état passé, présent et futur de l'océan. Le système devra être pertinent pour la validation et la calibration des modèles à différentes échelles (du global jusqu'au côtier).

Une observation pouvant servir plusieurs systèmes intégrateurs, le système devra maintenir une cohérence de traitement et de gestion pour l'ensemble des réseaux qui le composent. L'évolution de l'observation en océanographie d'une acquisition ponctuelle de données vers une acquisition massive de plus en plus "automatisée" (satellites, Argo, systèmes autonomes, balises sur mammifères marins, etc.) s'amplifiera dans le futur. On s'attend à ce que des avancées significatives concernant l'observation viennent du développement de systèmes interopérables dès leur conception, facilitant l'intégration des mesures dans des bases de données homogènes et interfacées dès l'origine avec les systèmes opérationnels. Pour cela, le système d'observation doit devenir davantage acteur de ce que seront les sous-systèmes d'observation hauturier/régional/côtier, ainsi que des systèmes d'observations existants ou futurs (pas forcément piloté par l'OO) qui seront toutefois une source importante d'observations.

Finalement, et dans le cadre du changement de paradigme entre la recherche et l'OO évoqué plus haut, le système d'observation ne devrait plus être un acteur passif dans la mise en place de l'instrumentation et des expériences nécessaires à la collecte des données (avec la notable exception d'ARGO). Il devrait, comme c'est déjà le cas pour les systèmes météorologiques, pouvoir promouvoir, soutenir, et piloter des actions de terrain. Il devrait également jouer un rôle majeur dans la gestion et la mise à disposition des bases de données d'observation.

Recommandations pour le système d'observation.

- R1. Contribuer à la maintenance et à l'évolution du réseau ARGO (déploiement de flotteurs mais également développement des Bio-ARGO, O2-ARGO et ARGO-profonds) et renforcer sa complémentarité avec l'observation spatiale. Un chantier "Argo & Observation Spatiale" pourrait être mis en place pour favoriser ces activités.
- R2. Etablir un schéma directeur du système d'observation pour chacune des échelles du système : identifier les zones ou les réseaux d'observations sont faibles, définir le paysage de l'observation spatiale aux différentes échelles en 2025 pour y préparer les systèmes (réflexion à mener avec le TOSCA), identifier des laboratoires régionaux ou densifier les observations serait utile, analyser les systèmes déjà en place, tel que MOOSE, pour identifier les améliorations possibles pour les systèmes à développer. Ces activités pourraient être traitées dans un chantier plus vaste focalisé sur les "Systèmes et Sous-Systèmes d'Observation" ou dans le cadre d'un "Science Direction Team" et s'inspirer des travaux menés dans le cadre REDEO.
- R3. Renforcer la mise en place de systèmes d'observations pérennes spécifiques aux domaines côtier et régional (e.g. courants de surface par radar HF, quantification des nutriments et contaminants drainés par les grands fleuves, flottilles de pêche de type RECOPECA) ainsi que leur coordination et coopération au sein de la structure opérationnelle. Activités à inclure dans le chantier "Systèmes et Sous-Systèmes d'Observation" déjà évoqué.
- R4. Renforcer la mise en place de systèmes d'observations et l'acquisition de données (dont des données de glace de mer) dans les régions polaires et étendre la période couverte par CORA pour les besoins de réanalyses. Chantier « Obs-sous-systemes ».
- R5. Mener une réflexion pour les systèmes re-localisables : concevoir des moyens d'observations dédiés rapidement déployables, déterminer sous quel forme et avec quel rapidité le système d'observation « fixe » (permanent ??) peut contribuer aux systèmes re-localisables. Chantier « Obs-sous-systemes ».
- R6. Déterminer, sur la base des systèmes d'observations déjà existants de l'observation spatiale (notamment de la couleur de l'océan) et des systèmes numériques et d'assimilation qui sont (ou seront) mis en place, les caractéristiques des composantes biogéochimiques et éco-systémiques du système d'observation.

5.2.2 Le Système intégrateur d'échelle globale

Le système global est un domaine d'excellence de l'OO française et son plan d'évolution doit être assez innovant et ambitieux afin de maintenir sinon consolider le leadership Européen de la France. La prospective recommande donc que le système global, tronc commun généraliste fournissant le contexte de grande échelle des systèmes d'échelle régionale et côtière,

- opère à des résolutions spatiales résolvant pleinement la mésoéchelle (résolution de grille proche du kilomètre à 45°N),
- possède des niveaux de complexité physique et biogéochimique qui soient cohérents, et adaptés aux observations pouvant être intégrées à l'échéance du projet,
- utilise des méthodes d'assimilations permettant des descriptions (hindcasts, analyses ou prévisions) probabilistes (méthodes d'ensembles par exemple) et des estimations d'erreurs validées.

La cible visée est composée d'un système déterministe de haute résolution (au moins 1/36°), associé à un système ensembliste/probabiliste de plus basse résolution si nécessaire (au moins 1/12°).

A l'échéance 2025, le modèle physique devrait:

- inclure le couplage vent/vagues/courants et considérer un certain degré de couplage à la couche limite atmosphérique marine dans le but de mieux traiter le forçage atmosphérique des couches de surface océaniques et d'améliorer ainsi la prévision des courants et autre propriétés de surface (dont la biogéochimie ainsi que ses rétroactions sur la physique qui devront être prises en compte).

- être couplé à une biogéochimie couvrant au moins le cycle du carbone (CO₂) et de l'oxygène et fournissant un contexte de grande échelle cohérent et adapté aux systèmes d'échelle régionale et côtière.
- intégrer le signal et les effets des marées.

Le système global intégrera les observations de température et de salinité de surface de la mer, les profils des flotteurs ARGO (de nouvelle génération, dont ARGO-profond et Bio-ARGO), les observations spatiales disponibles à l'horizon 2025 d'altimétrie, de couleur de l'eau, de diverses propriétés des glaces de mer (concentration, épaisseur, ...), de SST et SSS, etc., par le biais de méthodes incluant des approches d'ensemble multi-échelles. Les voies déterministe (~1/36°) et probabiliste (~1/12°) devront être développées et évaluées afin de définir précisément les caractéristiques constitutives du système cible. La base de données globale devra différencier les procédures de contrôle qualité temps réel et temps différé les mieux adaptées, notamment pour la réalisation de réanalyses à visée climatique.

Recommandations pour le Système Global

- R7. Le système global devra être basé sur les codes NEMO/PISCES. L'investissement de la communauté dans le développement de ce code devra être consolidé, tant du point de vue des volets physique que biogéochimique qui devront l'un et l'autre être maintenus au meilleur niveau de l'état de l'art.
- R8. Enrichir de la physique décrite par le système grâce à la prise en compte du couplage vagues/courant, du couplage de la couche de mélange océanique avec la couche limite atmosphérique marine, des marées (pronostiques ou couplage à un modèle indépendant). Un chantier "Dynamique des Couches de Surface" et un chantier "Marée Globale" devraient être mis en œuvre pour adresser cette recommandation en lien avec les autres composantes du système générique.
- R9. Favoriser les approches « déterministe très haute résolution » et « ensembliste ». Le système actuel qui couvre sur des systèmes globaux ou régionaux les résolutions du 1/4°, 1/12° et 1/36° possède les bases pour un prototype adapté à la réalisation des développements nécessaires. Un chantier "Assimilation Ensembliste/Probabiliste" devrait être mis en œuvre, focalisé dans un premier temps sur la taille des ensembles et ses implications sur le dimensionnement des systèmes, la fourniture d'incertitudes quantifiées sur les variables essentielles dont la production primaire globale, et l'apport de ces approches pour les réanalyses qu'elles soient globales ou régionales.
- R10. Préparer l'assimilation des observations spatiales disponibles en 2025, avec plusieurs points de focalisation, comme par exemples les observations d'altimétrie à large fauchée (SWOT), celles de couleur de l'eau géostationnaire ou encore les images à très haute résolution spatiale. La question de l'écart entre les échelles résolues par les modèles et celles vues par les observations devra être adressée. Les recherches nécessaires pourraient être menées dans le cadre d'un chantier "Assimilation de données futures" (qui inclurait les informations sur les variables biogéochimiques fournies par les profileurs Bio-ARGO).
- R11. Définir le niveau optimal de complexité biogéochimique en fonction des applications visées (par exemple pour aborder à terme la question de l'acidification des océans à partir des réanalyses). Dans un premier temps, il s'agira de se focaliser sur la production primaire et l'oxygène dissous, pour aller ensuite vers les niveaux trophiques supérieurs et le cycle du carbone. La modélisation explicite des propriétés optiques devrait permettre à terme une meilleure exploitation des observations spatiales. Le niveau de complexité requis pour fournir les conditions initiales et aux limites nécessaires à la biogéochimie/biologie de la branche régionale devra être défini. L'opportunité de la biogéochimie "on-line" devra être validée dans un système de résolution 1/36° grâce à la technique de "coarsening". Ces travaux pourront se faire dans le cadre d'un chantier "Couplage Physique-Bio" dont l'objectif serait de favoriser l'émergence d'une plate-forme couplée à toutes les échelles entre physique et biogéochimie (au départ sur la base de PISCES).
- R12. Le Plan de mise en œuvre du système global, qui se déclinera en plusieurs modèles globaux, devra servir les applications opérationnelles et recherches de la mission de l'OO globale (service à Météo France, services Copernicus dont les réanalyses et les services des CL systèmes européens).

5.2.3 Le système d'échelle régionale.

Un système régional pouvant couvrir jusqu'à l'échelle d'un bassin océanique (Atlantique Nord par exemple), permettant une focalisation sur les façades métropolitaines, sera opérationnel avec une plus haute résolution pour résoudre les échelles caractéristiques de la dynamique de plateau et de talus (de l'ordre de quelques centaines de mètres à 45°N, soit $\sim 1/108^\circ$). Le système régional devra inclure la totalité du talus continental (donc une partie de la plaine abyssale) et s'étendre jusqu'à la côte, car le talus est un lieu de génération de mouvements internes qui impactent fortement la dynamique sur le plateau jusqu'à la côte, et que le spectre d'échelles de ces mouvements internes ne pourra être résolu par le modèle global. Il intégrera des modélisations encore plus complètes de la dynamique (marée, surcotes, vagues, couplage plus ou moins évolué avec l'atmosphère, ...) et de l'environnement marin (biogéochimie, sédimentologie, prise en compte des bassins versants, ...) et des observations locales (qui devront être totalement interoperables avec les observations aux autres échelles). La prospective a montré l'existence d'un fort intérêt pour les approches de prévision probabiliste à cette échelle. Il sera interfacé (niveau de couplage à définir) avec le système global, et éventuellement au système d'échelle côtière (upscaling pour le forçage par les apports continentaux). Le système régional devrait intégrer une capacité de re-localisation (ou projection).

Recommandations pour le système d'échelle régionale

- R13. Définir et mettre en œuvre le couplage/interface avec le global pour la physique et pour la biogéochimie. On pourra au départ travailler avec un prototype régional couvrant les façades métropolitaines et procéder par étape à partir du système existant ($1/12^\circ - 1/36^\circ$) pour aller progressivement vers l'objectif $1/36^\circ - 1/108^\circ$. Il faut noter que certaines actions du projet AMICO (Action vers une Modélisation Intégrée Côtière Opérationnelle, GMES-MDD) adressent ces questions qui concernent a priori tout autant les branches côtières que régionales. La recommandation est de poursuivre les engagements dans ce projet et l'identifier comme un des chantiers initiaux.
- R14. Enrichissement de la physique. Les besoins concernant l'échelle régionale ont un très large recouvrement avec ceux identifiés pour l'échelle globale (voir R8) et devraient être traités dans le même chantier. Des besoins plus spécifiques aux échelles régionales et côtières est l'enrichissement des paramétrisations de la couche limite de fond pour le couplage avec la sédimentologie. Il faudra étudier si le couplage avec la CLAM doit être plus "intégré" (par exemple aller vers un système régional des façades métropolitaines qui soit un système couplé intégral O/A exigeant développements et opération en partenariat étroit avec Météo France.
- R15. Définir le niveau de complexité de la biogéochimie et la sédimentologie. Il s'agit d'abord de satisfaire l'objectif de fournir des conditions initiales et aux limites aux modèles d'échelle côtière. Il faudra étudier si un couplage pelagos/benthos à cette échelle ($1/108^\circ$) incluant un plus grand nombre de groupes phytoplanctoniques sera nécessaire. Les actions de recherche nécessaires pourront se réaliser dans le chantier " Couplage Physique-Bio " évoqué pour le global (R11), proposer une régionalisation du modèle biogéochimique global et créer les interfaces avec le côtier et le continent. Là encore, une interaction avec le projet AMICO qui s'intéresse à la descente d'échelle dans les modèles biogéochimiques est recommandée.
- R16. Développer les approches ensemblistes pour la prévision dans le domaine régional et côtier. Il existe un recouvrement certain sur les méthodes avec le chantier "Assimilation Ensembliste/Probabiliste" déjà identifié pour le global (R7). L'approche régionale doit se faire sur une région où il y a suffisamment d'observations pour répondre aux questions posées (Atlantique Nord ou Nord-Est).

5.2.4 Un système à l'échelle côtière.

A cette échelle, le système intégrateur devrait être constitué par un ensemble de systèmes côtiers, continuum du système régional, chacun focalisé sur une région particulière des façades métropolitaines et éventuellement outre-mer, ayant des résolutions de quelques centaines de mètres à la côte et dans les estuaires. En effet, plus on s'approche des côtes, plus il est pertinent d'accroître la résolution :

- pour restituer l'effet des aspérités du trait de côte et des gradients bathymétriques

- parce que l'on s'approche de sources potentielles confinées (rivières, rejets anthropiques accidentels ou chroniques, autant de forçages majeurs pour l'environnement marin côtier)
- parce que l'orographie est susceptible de générer des gradients de forçage atmosphérique forts.

Leur niveau de complexité, qui dépendra de leurs objectifs propres (surcotes, circulation, biogéochimie, ...), sera supérieur à celui évoqué pour les autres échelles pour certains aspects spécifiques au domaine côtier comme par exemple, les vagues (déferlement), les marées (bancs découvrant), la sédimentologie, la biologie (écosystèmes), la connexion avec les bassins versants, etc. Du fait de leurs objectifs, les systèmes côtiers intégreront dans la mesure de leurs disponibilités les observations spécifiques à ce domaine et les analyses des systèmes globaux et régionaux pour assurer le continuum du point de vue de l'utilisateur des produits de ces différents systèmes. Enfin, une approche ensembliste, certainement multi-systèmes, voire au sein de certains systèmes probabilistes, sera adoptée. Un véritable challenge sera de parvenir à produire un système côtier généraliste suffisamment souple mais néanmoins riche de possibilités pour qu'il soit facilement adaptable à une grande variété d'applications. Comme pour le système régional, les systèmes côtiers seront à la base de la construction des capacités de re-localisation et/ou de mise en œuvre dans le cadre de partenariats de systèmes spécialisés projetables.

Recommandations pour l'échelle côtière

- R17. Définir les niveaux de complexité des composantes phys/bio/sedimento d'un système côtier générique et de leur couplage. Il faudra étudier l'apport d'une modélisation non-hydrostatique, et considérer le déferlement des vagues et bancs découvrant, la variabilité de nature des fonds, le transport sédimentaire, la remise en suspension et turbidité de la colonne d'eau, les écosystèmes et l'habitat benthique, prendre en compte une plus grande spéciation des phytoplanctons et des niveaux de chaîne trophique, le couplage pelagos/benthos, le couplage avec les bassins versants, ... Il faudra considérer les possibilités offertes par l'utilisation de résolutions spatiales différenciées (coarsening).
- R18. Définir et mettre en œuvre le couplage/interface avec le régional pour la physique et pour la biogéochimie et la sédimentologie, en y associant le forçage par le continent, en considérant la possibilité d'un upscaling du côtier vers le régional, en particulier pour les variables biogéochimiques.
- R19. Développer les approches ensemblistes pour la prévision et la surveillance du milieu côtier. Coordonner les recherches nécessaires avec les chantiers assimilation probabiliste/ensembliste déjà identifiés et dont les activités viseront à couvrir les 3 échelles.
- R20. Amélioration des modèles numériques. Cette recommandation est valable pour les systèmes à toutes les échelles, mais il est plus crucial à l'échelle côtière qui n'est pas organisée autour d'un code commun géré à l'échelle européenne comme c'est le cas pour le hauturier avec NEMO. Il faudra tirer les enseignements du projet COMODO (ANR) et les mettre en œuvre, et assurer des bonnes interactions/coordinations avec la prospective NEMO/PISCES et la suite éventuelle des projets COMODO et DRAKKAR.

5.2.5 Capacités d'interactions avec des systèmes spécialisés.

Un système intégrateur re-localisable/projetable sera nécessaire. Il s'agit de construire une capacité à déployer, généralement dans le cadre d'un partenariat, en temps réel (par exemple gestion de crise) ou différé (par exemple étude d'impact ou étude de surveillance)

- un système intégrateur spécialisé permettant des descentes d'échelles et
- des systèmes complémentaires d'observation in situ adaptatifs ou dédiés.

Il faudra également développer des capacités pour des applications spécifiques à l'échelle du littoral ou de l'estuaire, mais aussi avec les systèmes de surveillance de l'halieutique par exemple, les systèmes utilisés pour la sécurité en mer, le suivi des pollutions etc. La question de définir comment l'OO généraliste doit interfacer ses activités avec des systèmes très spécialisés souvent très spécifiques à des régions géographiques restreintes, et opérés par des organismes dont c'est la mission ou à des sociétés de service du secteur privé.

Recommandations

- R21. Construire, tester et évaluer un prototype interfacé aux différents systèmes généralistes sur la base des systèmes génériques d'échelle régionale et côtière
- R22. Développer des capacités d'interface. Les systèmes spécialisés par application ne peuvent sans doute pas être inclus dans le système généraliste, mais ils doivent pouvoir s'y interfacer.

5.3 Des chantiers scientifiques structurants pour notre communauté

Un chantier est une action de recherche structurante focalisée sur une thématique scientifique spécifique, associant pleinement la communauté recherche et la communauté opérationnelle, avec pour objectif de conduire à des avancées scientifiques favorisant tous les aspects du développement du futur système opérationnel. Leur durée devrait excéder la durée des projets de recherche soutenus par les programmes de LEFE ou ANR (donc > 3 ans). Le contenu et la durée d'un chantier est susceptible d'évoluer.

Les chantiers étant des actions longues et fédératrices, dont le thème scientifique reflète une motivation particulière de la communauté ayant participé aux journées de prospectives, ils sont en nombre restreints. L'analyse menée lors des journées prospectives nous permet de proposer le cadre initial des chantiers prioritaires qui seront dans la plupart des cas organisés de façon transverse aux composantes globales/régionales/côtières du système générique.

5.3.1 Chantier Argo & Observation Spatiale.

Ce chantier a pour objectif de susciter et coordonner les études scientifiques qui permettront

- de définir et mettre en œuvre une stratégie de déploiement des flotteurs ARGO qui contribue à la maintenance du réseau global,
- de poursuivre le développement et renforcer l'utilisation des Bio-ARGO et ARGO-profonds au sein du réseau,
- de renforcer la complémentarité du réseau de flotteurs avec l'observation spatiale, en menant en particulier une réflexion en profondeur sur l'homogénéisation entre la surface et la structure verticale (i.e. Satellites vs Bio-Argo).

5.3.2 Chantier Systèmes/Sous-Systèmes d'Observation

L'objectif d'un tel chantier de susciter et coordonner les études scientifiques qui permettront de contribuer de façon active au développement de systèmes d'observation complémentaires des réseaux existants afin de constituer un système d'observation aussi complet que possible et cohérent avec l'aspect multi-échelles/multi-disciplines du système intégrateur et ainsi répondre aux recommandations R2 à R4 sur les systèmes d'observation. Un tel chantier devrait être coordonné avec le TOSCA.

5.3.3 Chantier Dynamique des Couches de Surface

Ce vaste chantier rassemblera les études portant sur la dynamique des couches de surface, afin d'améliorer sensiblement la représentation des courants de surface et des propriétés (physiques et biogéochimiques) de la couche de mélange océanique. Des approches nouvelles permettant l'enrichissement de la physique traitée par le modèle dans un contexte de très haute résolution visées à l'horizon 2025 (1/36° à 1/108°) seront favorisées. Nous citons comme exemples la prise en compte des vagues soit dans les paramétrisations du mélange et des flux air-mer soit par le couplage avec un modèle de vagues, ou les rétroactions de la biogéochimie sur la physique via la pénétration des flux radiatifs). Un nouveau paradigme servira de cadre à l'estimation des flux de surface ou un couplage faible avec la couche limite atmosphérique marine sera préféré à l'approche forcée classique. Ce chantier commun aux différentes échelles (global/régional/côtier), posera cependant des questions différentes selon l'échelle considérée (par exemple spécifiquement pour le côtier - les brises, l'affaiblissement du vent à proximité de la côte, le déferlement des vagues,...).

5.3.4 Chantier Marée Globale

Ce chantier aura pour objectif la prise en compte de la marée (et de ses effets sur les courants et le mélange) dans le futur système global selon des méthodologies à définir (modélisation directe de la marée, couplage "faible" avec un modèle de marée, paramétrisations, ...). La cohérence avec le système d'échelle régionale sera une contrainte importante à considérer.

5.3.5 Chantier Assimilation Ensembliste/Probabiliste

L'objectif de ce chantier sera de réunir les compétences de la communauté nationale active dans le domaine de la modélisation stochastique et de l'assimilation ensembliste afin de faire émerger une nouvelle vision de l'approche intégrée en océanographie incluant pleinement la caractérisation des incertitudes. Il devra s'articuler avec les atmosphériciens et les climatologues qui partagent les mêmes préoccupations dans le contexte de systèmes dynamiques de très grande taille. Les travaux menés dans le cadre de ce chantier auront pour cible la production d'une information probabiliste pour caractériser les états physiques et biogéochimiques analysés et prévus par les composantes hauturière, régionales et côtière des systèmes opérationnels temps réels ainsi que les réanalyses.

5.3.6 Chantier Assimilation Données Futures et OSSE

Ce chantier visera à la meilleure exploitation possible des approches d'observation spatiales et in situ (de l'océan physique, biogéochimique, des interfaces océan-atmosphère incluant les surfaces glacées et des interfaces avec les continents) prévues pour les prochaines décennies dans les systèmes d'océanographie opérationnelle. Il adressera la question du design optimal des futurs systèmes d'observation de l'océan (au travers d'OSSEs par exemple), de leur intégration dans les modèles du futur résolvant une large gamme d'échelles spatio-temporelle, du contrôle de qualité des données consistant avec les produits opérationnels, et des implications sur la conception des modèles.

5.3.7 Chantier couplage physique/bio

Ce chantier visera à favoriser l'émergence d'une plate-forme couplée entre physique et bio avec comme point de départ le système de modélisation NEMO/PISCES. Les produits (réanalyses, analyses, et prévision) du système devront décrire la biomasse, aussi ce chantier devra considérer les aspects intégrés. Des modèles optiques devront être implémentés pour mieux traiter les données spatiales. Pour améliorer les liens avec les observations, il faudra mener une réflexion profonde sur l'homogénéisation entre les proxies classiques (i.e. la Chlorophylle) et l'information biologique pure, entre l'inorganique (i.e. les nutriments) et l'organique (i.e. la biomasse).

5.3.8 Chantier Réanalyses globales

Les réanalyses océaniques resteront parmi les activités prioritaires de l'OO. L'extension du champ d'application des réanalyses, (jusqu'à présent focalisé sur la physique globale), à la biogéochimie et au domaine régional pourrait se faire dans le cadre d'un chantier qui favorisera le développement de méthodes d'assimilation adaptées et l'évolution de la base de données CORA selon les périodes considérées et les régions considérées.

Partie 4 : Conclusion

6 Conclusion

La prospective propose d'élargir et d'enrichir la dimension multidisciplinaire de l'océanographie opérationnelle, en identifiant deux cibles particulières pour l'horizon 2025:

- Une intégration homogène et cohérente (seamless) dans le système opérationnel des échelles hauturière, régionale, côtière et littorale et des processus associés.
- Une extension du champ des variables essentielles à estimer, avec l'introduction de la biologie et de la biogéochimie marine au cœur du système pour permettre le développement des applications en aval (variables essentielles nutritifs, oxygène, grandes espèces phytoplanctoniques).

Des défis scientifiques/chantier ont été amenés au premier plan de la scène:

- Devenir davantage acteur de ce que sera le système d'observation hauturier/régional/côtier et définir le système "idéal" et des options plus ou moins prioritaires.
- Passer de la notion de système forcé à celle de couplage faible océan/atmosphère (incluant les vagues) selon des méthodologies à définir.
- Prendre en compte la marée à toutes les échelles.
- Répondre au défi de la résolution "effective" des processus, c'est à dire amener le numérique au bon niveau pour résoudre proprement la méso-échelle dans le global et les processus côtiers spécifiques d'où probablement le besoin d'un modèle global au 1/36° et une résolution s'accroissant encore jusqu'à la côte et en phase avec les futures observations à assimiler (e.g. SWOT).
- Avoir une véritable capacité de déploiement re-localisable pour traiter l'événementiel mais aussi afin de pouvoir implanter des "zooms" dans le global pour rejoindre la côte ailleurs que sur les façades métropolitaines, et raffiner régionalement les "tipping points" régionaux de la circulation océanique.
- Le besoin est aussi d'aller vers la production d'une information probabiliste / ensembliste pour caractériser les états physiques et biogéochimiques estimés ou prévus.

La prospective suggère également un changement d'approche et de fonctionnement recherche/opérationnel

- Changement de paradigme : la communauté recherche n'est plus là principalement pour aider à construire un système avec les acteurs de l'opérationnel, mais est un partenaire au sein d'une coopération plus intégrée, avec répartition des efforts en fonction du savoir-faire de chacun, de ses missions propres et des bénéfices mutuels à en retirer.
- Besoin de mener des « chantiers » communs (pas géographiques mais thématiques), c.a.d. des actions structurantes de recherche nécessitant une durée supérieures à 3 ans.
- Réfléchir en lien avec les évolutions européennes sur la R&D à faire en propre et celle sur laquelle on pourra s'appuyer au niveau UE, et adapter notre organisation de la R&D (dont le GMMC) en conséquence.
- Besoin d'un comité moins « exécutif » que le Conseil Scientifique du GMMC, ayant un objectif plus stratégique sur le long terme, en particulier pour le suivi de la prospective et de son implémentation.

La prospective a fait émerger une vingtaine de recommandations et une dizaine de chantiers qui sont décrits dans ce document. Ils seront prochainement soumis à la communauté scientifique qui a participé à ces travaux, qui pourra ainsi en affiner le contenu, en étayer les conclusions, et définir les priorités pour l'édition d'une version finalisée.