

Prospective Scientifique de l'océanographie opérationnelle

Rapport final au 9/10/2013

Avant Propos

Ce document présente le rapport de « prospective scientifique de l'océanographie opérationnelle ». Les principales étapes ayant rythmé cette prospective sont rappelées ci après.

1. Etape 1 – Octobre 2012-Avril 2013: consultation de la communauté

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: Rédaction 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 (voir sa composition ci-après), 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 communauté

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.

4. Etape 4 – 30 septembre-30 Octobre: Rédaction/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 le 10 octobre 2013. Diffusion à la communauté scientifique et publication sur le Web des commentaires de la revue dans le courant du mois d'octobre.

Constitution du Comité de Pilotage et de Rédaction de la Prospective

Bahurel Pierre	: MERCATOR Océan
Barnier Bernard	: GMMC (Président entrant)
Brasseur Pierre	: GMMC (Président sortant)
Dombrowsky Eric	: MERCATOR Océan
Dumas Franck	: PREVIMER
Le Traon Pierre Yves	: PREVIMER
d'Ortenzion Fabrizio	: GMMC (membre du Conseil Scientifique)
Pouliquen Sylvie	: CORIOLIS

Contenu

1	Introduction.....	2
1.1	L'océanographie opérationnelle et son domaine scientifique.....	2
1.2	L'exercice de prospective.....	4
2	Contexte de développement sur les 20 dernières années.....	5
2.1	Vingt ans de développement rapide.....	5
2.2	Les éléments de contexte qui ont compté.....	5
3	Bilan scientifique des vingt premières années.....	10
3.1	Les fondements scientifiques de l'océanographie opérationnelle : enjeux et défis.....	10
3.2	Avancées marquantes de la recherche et déclinaisons opérationnelles.....	11
3.3	Mécanismes et instruments programmatiques de transfert de la recherche aux applications opérationnelles.....	17
3.4	Forces et faiblesses identifiées.....	18
3.5	Ce qu'on en retient.....	19
4	Contexte de développement sur les 10 ans à venir.....	20
4.1	Les enjeux liés à l'océanographie opérationnelle, et les attentes des utilisateurs et des financeurs.....	20
4.2	Les enjeux scientifiques liés à cette discipline.....	20
4.3	A propos des infrastructures, à propos de GMES/Copernicus et des programmes internationaux.....	21
4.4	A propos des Mercator Océan, Coriolis et Previmer.....	22
4.5	Ce qu'on retient : Opportunités et menaces.....	22
5	Prospective scientifique sur les 10 ans à venir.....	23
5.1	Des choix nécessaires dans les priorités scientifiques.....	23
5.2	Contours et composantes d'un Futur Système Opérationnel Générique.....	26
5.3	Des chantiers scientifiques structurants pour notre communauté.....	31
5.4	Questions non abordées par la prospective.....	33
6	Conclusion.....	34
7	Liste des acronymes.....	35
8	Liste des participants.....	37

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 (voir encadré ci après).

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 Previmar (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 centaines de 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, aux domaines littoral et côtier et aux zones polaires englacées, ajoutant autant de complexité et de défis scientifiques à maîtriser.

Domaines d'utilisation des produits de l'Océanographie Opérationnelle

L'OO permet de prédire l'état du « système océan »; de produire des valeurs instantanées et des statistiques réalistes des paramètres visés, même en l'absence de mesure directe de ces paramètres; de rejouer des événements passés, en y intégrant des données non disponibles en temps réel, de manière à générer en temps différé la meilleure description possible des phénomènes et des situations ; de simuler des situations futures selon plusieurs scénarios permettant de venir en appui aux décisions publiques. L'océanographie opérationnelle permet l'établissement de climatologies pour identifier des tendances, mettre en évidence des anomalies et dériver des indices environnementaux.

La valorisation d'une information générale sur l'océan bénéficie à de multiples domaines:

- Pollutions accidentelles : suivi et prévision des dérives de nappes;
- Sécurité maritime et transport maritime (recherche de personnes en mer et prévision de la dérive d'objets, routage);
- Prévision météorologique et prévision des événements extrêmes à enjeux de sécurité (intensité et trajectoire des cyclones outre-mer, intensité des événements cévenols en métropole, vagues et marées de tempêtes provoquant des phénomènes de submersion en zone littorale);
- Prévision saisonnière, décennale et projections climatiques;
- Couplage vers la modélisation biogéochimique et la gestion des ressources halieutiques;
- Océanographie militaire (état de mer, courants, propriétés acoustiques de la colonne d'eau et du substrat, propriétés optiques...);
- Applications offshore (exploitation pétrolière, routage et pose de câbles sous marins);
- Surveillance environnementale tant biologique que sanitaire et la gestion des impacts du changement climatique. Le suivi des aires marines protégées;
- Anticipation des crises microbiologiques sanitaires et efflorescences algales toxiques ;
- Support aux activités économiques de la frange littorale (aquaculture, pêche, transport maritime, aménagement offshore, énergies renouvelables en mer, loisirs nautiques, qualité des eaux de baignades ou aquacoles, gestion et aménagement de l'espace littoral).
- Support aux décisions de politique publique et programmes d'action en matière d'environnement, tant au niveau national et international que régional et local (e.g. impact de mesures visant à réduire le développement d'algues vertes en zone littorale).

L'océanographie opérationnelle se caractérise ainsi par la grande variété de ses filières d'application. C'est le propre de l'océanographie opérationnelle d'avoir su synthétiser dans une réponse intégrée des demandes issues de secteurs applicatifs très différents et des réglementations qui distinguent souvent des domaines géographiques maritimes (eaux côtières, eaux marines...). L'océan ne connaît pas ces frontières : les services d'analyse et de prévision de l'océanographie opérationnelle intègrent l'ensemble du domaine du large à la côte.

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 avals. 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 grands axes scientifiques 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. Un rapport provisoire restituant ces travaux a été rédigé par le comité de pilotage de la prospective, se focalisant principalement sur les axes scientifiques à privilégier, et n'abordant qu'à la marge les questions de stratégie opérationnelle et de moyens à déployer qui nous ont semblé être plus pertinents dans le cadre d'un plan d'implémentation.

Le rapport a été soumis à la communauté pour revue entre le 15 juillet au 28 septembre 2013. Les remarques venant de la communauté ont donné lieu à de nombreuses modifications, et l'exercice de prospective s'achève donc 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. Les revues ayant apporté une masse d'information intéressante qui n'a pu être intégrée dans ce document pour diverses raisons, le comité de pilotage réfléchi à la façon de les porter à la connaissance de la communauté.

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'ont été entre autres discutés et décidés 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, allait 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. En 2007 également, une initiative nouvelle en matière d'océanographie opérationnelle baptisée PREVIMER voyait le jour. Elle est spécifiquement orientée vers le domaine côtier et vise à proposer une nouvelle offre en aval du Marine Core Services.

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) coordonné 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 de l'Océanographie Opérationnelle hauturière

- 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. Elles ont permis d'affiner les évaluations du contenu de chaleur dans les couches de surface de l'océan et son évolution au cours des dernières années.

- La puissance de calcul

L'émergence de nouveaux moyens de calcul a permis de mettre en machine des gros codes de simulation numérique 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 vérifié 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 opérationnelle 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 système de modélisation des circulations océaniques performant. Un consortium international de développeurs et d'utilisateurs fait évoluer cet outil en mode participatif afin qu'il réponde au mieux aux besoins des communautés opérationnelles et de recherche. Les principaux OGCM évoluent par le jeu naturel de l'activité scientifique : une bonne idée publiée par un des groupes est généralement évaluée et souvent reprise par les autres. NEMO est avec MOM et HYCOM l'outil le plus utilisé pour la modélisation hauturière à haute résolution. Il a été adopté par les Britanniques pour une grande part de leurs besoins, et récemment par nos collègues Italiens pour leur système opérationnel sur la Méditerranée à l'INGV) et l'étude du climat (au CMCC). NEMO est en définitive devenu le standard Européen adopté majoritairement dans le cadre de Copernicus. Le choix d'investir exclusivement sur NEMO à Mercator Océan a été fait dès sa création, et a été un des aspects très structurants 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 Océan (www.mercator-ocean.fr) est le centre français d'analyses et de prévisions océaniques. Il conçoit, développe, opère et maintient à l'état de l'art scientifique des systèmes d'analyses et prévisions océaniques capables de décrire, d'analyser et prévoir l'état de l'océan en 3D, en continu et en temps réel, à

l'échelle globale ou régionale. L'information numérique produite renseigne sur la circulation océanique sur l'ensemble du globe (grands courants, tourbillons et turbulences, niveau de la mer, ...), l'état thermo-halin (grandes masses d'eaux, température, salinité, densité), l'état biogéochimique (chlorophylle, oxygène, production primaire, ...) et l'état des zones englacées aux hautes latitudes (couverture, volume, mouvements de glace).

Mercator Océan est désormais soutenu par cinq grands établissements publics français - CNRS, IFREMER, IRD, Météo-France et SHOM – impliqués dans le développement de l'océanographie opérationnelle. Ils mutualisent avec Mercator Océan un besoin commun de recherche & développement d'une part et de production opérationnelle et scientifique d'autre part pour une surveillance des océans. Mercator Océan rassemble une équipe de 50 personnes, basée à Ramonville Saint-Agne (proche Toulouse), dont le cœur de métier est la modélisation numérique de l'océan et l'assimilation de données satellitales et in situ dans ces modèles pour élaborer la meilleure représentation numérique de l'océan. Sa force principale consiste dans sa maîtrise des systèmes de très grande dimension (exigeant des supercalculateurs et des espaces de stockage de données de très grande dimension) qui lui permet de représenter l'ensemble du globe avec une résolution permettant le suivi de l'état tourbillonnaire de l'océan. Dépendant en amont des observations de l'océanographie spatiale (satellites) et de l'océanographie in situ (navires), Mercator Océan a contribué à dynamiser leur usage sur l'aval dans des filières spécialisées (environnement, transport, recherche, défense, etc.) en élaborant une information synthétique et de grande qualité scientifique. Les outils de Mercator Océan permettent également en retour de mesurer l'impact des systèmes d'observation sur les applications clientes et sont donc des atouts importants pour les agences d'observation.

Les activités de Mercator Océan s'étendent de la R&D aux systèmes opérationnels, de l'expertise de prévisionnistes aux services aux utilisateurs.

Mercator Océan pilote depuis 2009 le projet Européen MyOcean dans le cadre du programme COPERNICUS, ce qui le place en situation de chef de file d'un réseau de 60 partenaires en Europe. Ses produits sont diffusés dans une centaine de pays à travers le monde. Ceci prépare l'ouverture d'un service Européen d'analyses et de prévisions océaniques à l'horizon 2014.

Initié sous forme d'un projet dès 1995, Mercator a été dans un premier temps soutenu par les organismes 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 qui, présent dès la fondation de Mercator Océan, ne fait pas partie aujourd'hui du tour de table de la société civile). La structure ainsi créée 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 (moins de 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 de 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, Météo-France et l'IRD en phase I du projet), 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 et de prévision de l'environnement côtier sur les zones métropolitaines Manche/Gascogne/Méditerranée et ultra-marines (démonstrateur néo-calédonien de l'IRD) et dans un second temps (2008-2013) de jeter les bases de services opérationnels qu'il reste dans une large mesure 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 aval via les pôles de compétitivité, par des financements européens Interreg 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 attachés 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.

- **Le TOSCA et les programmes spatiaux**

On peut également citer le programme TOSCA du CNES (Terre solide, Océan, Surfaces Continentales et Atmosphère), qui est entre autre un programme de recherche spatiale (qui émet un appel d'offre annuel). Il permet de soutenir les équipes de recherches (financement de thèses, de post-docs, de CDD, de projets dans le cadre des AO TOSCA) qui travaillent sur la science nécessaire pour faire avancer la connaissance liée à l'observation spatiale, en particulier pour l'océan. Le TOSCA fait au niveau national écho à des opportunités de recherches qui existent au niveau Européen (via l'ESA et Eumetsat).

- Les projets au sein des organismes

Le SHOM mène des activités de R&D et opère des capacités de prévision océanographique opérationnelles depuis plus de 20 ans. Le programme OZONE (Océanographie Opérationnelle et Observation) coordonne les activités et contributions du SHOM en matière d'océanographie opérationnelle pour le soutien de la défense et les besoins de service public. Le programme comporte 3 volets : observations, modélisation et prévision. Une partie des activités correspondantes est réalisée dans le cadre de PREVIMER. Le volet observation inclut le développement d'instrumentation, des activités d'observation à la mer et les activités de qualification/validation (intégrées à Coriolis). Le volet modélisation comporte plusieurs composantes : une composante permanente et globale s'appuyant en particulier sur Mercator-Océan et une composante réactive sur mesure pour la fourniture de prévisions hydrodynamiques et d'états de mer aux échelles régionale à littorale dans les zones et les périodes de crise. Cette composante est basée sur les résultats du programme d'étude amont MOUTON (2001-2010, Modélisation Océanique d'Un Théâtre d'Opérations Navales) visant à doter les forces d'une capacité nationale de prévision à l'échelle régionale. La capacité, basée sur HYCOM (seul modèle de la communauté scientifique nationale en coordonnées hybrides isopycnales – pression développé conjointement avec des partenaires français, européens et américains), est opérationnelle depuis 2011, est actuellement étendue à l'ensemble des zones d'intérêt et acquiert un caractère opérationnel permanent. Le programme PROTEVS (2010-2018, Prévision Océanique Turbidité Écoulement Vagues et Sédimentologie) vise à construire à l'horizon 2020 un système de prévision intégré des paramètres physiques de l'environnement marin de l'échelle régional jusqu'au littoral. Le dernier volet « prévision » est assuré par le système SOAP (Système Opérationnel d'Analyse et de Prévision) opéré par une cellule de prévisionnistes-océanographes, assurant la production et la diffusion quotidienne des services à plus-value notamment pour la défense.

2.2.3 Les programmes internationaux

- GODAE Ocean View

Au niveau International, GODAE (Global Ocean Data Assimilation Experiment) et son successeur, depuis 2008, GODAE OceanView regroupent 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 en particulier 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. C'est également dans ce cadre qu'a été lancé, et que sont conduits, en collaboration entre CLIVAR et GODAE OceanView, des projets d'intercomparaison de réanalyses océaniques.

- 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 trente quatre membres venant de seize pays européens, EuroGOOS a depuis fin 2012 entamé la transformation en une entité légale, l'ASBL : (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 opérationnelle 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

Nous avons évoqué plus haut comment, 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. Le focus était donc principalement hauturier. 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 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 de l'état atmosphérique ; 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 quatre dimensions a mis en évidence la nécessité de dimensionner la constellation altimétrique avec un minimum de trois voire quatre 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, complémentaires d'autres réseaux d'observation *in situ* (Réseaux de mouillages tropicaux, Navires de recherche et d'opportunité, OceanSites, DBCP,..). 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. Le projet PREVIMER a néanmoins permis le déploiement de nouvelles plateformes de mesures (RECOPECA, Radar HF, gliders, SMATCH,..) et des développements instrumentaux (ARVOR-C multicateur, plateforme d'observation de la turbidité, MOLIT...).

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

pour l'analyse mais aussi la validation des systèmes. C'est en particulier le cas des informations lagrangiennes relatives à la dérive des flotteurs Argo, des observations de tension de vent, des propriétés 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 hauturières

L'émergence de la modélisation aux équations primitives remonte aux années 70, notamment au travers des travaux précurseurs menés au GFDL. Toutefois, ce n'est que depuis les années 90 que les modèles aux équations primitives sont devenus 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. Néanmoins, les modèles actuels restent soumis à l'hypothèse hydrostatique et 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.

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 ou du bord des marges continentales suggérerait des approches plus flexibles comme celle des éléments finis: les efforts entrepris par certains groupes internationaux dans cette direction ont été peu relayés au niveau national. En revanche, différents types de coordonnées verticales (géo-potentielle, sigma, hybrides) sont à présent maîtrisées.

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 deux 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 et temporelle du milieu, que cette variabilité réside dans les forçages (météo, marée et vagues) ou dans la morphologie même des bassins (aspérités bathymétrie, hétérogénéité des fonds...). Une partie de ce défi a été relevé dans le cadre de PREVIMER, donnant lieu à de nombreux 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 des ingrédients scientifiques essentiels de l'océanographie opérationnelle. Il s'agit d'un domaine encore insuffisamment connecté à ses activités. L'intégration de cette thématique nécessitera de renforcer au niveau national, les synergies entre les communautés océan, atmosphère et surfaces continentales.

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 requiert le développement d'approches beaucoup plus spécifiques (par exemple la prise en compte des échanges avec les sédiments, l'ajout d'une diversité spécifique particulièrement les espèces nuisibles aux activités humaines mais aussi celles permettant de mieux décrire le réseau trophique d'espèces supérieures) 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 Bio-Argo) 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 vingt 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 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 esquissée semble une 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 $1/12^\circ$) 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 (analyses, réanalyses et prévisions) 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 sinon à inventer, du moins à préciser dans une large mesure, en fonction notamment de ce que sera le système d'observation, le couplage avec l'atmosphère et le forçage par les apports continentaux, l'imbrication dans les systèmes hauturiers et des applications visées. Ceci est d'autant plus vrai que la capacité des systèmes opérationnels à produire des prévisions, tant à court terme qu'à plus longue échéance, dépendra très directement de la qualité des conditions initiales océaniques et aux frontières ouvertes, ainsi que du réalisme des conditions atmosphériques et des apports continentaux vus par l'océan. De façon générale, les travaux scientifiques dans le domaine de la prédictibilité, tant pour l'océan hauturier que côtier, sont restés jusqu'à présent très discrets et clairement en deçà du nécessaire pour construire de véritables systèmes de prévision océanique aux performances maîtrisées.

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 Etats Unis notamment avec ECCO et SODA, et en Europe dans le cadre du volet réanalyses de MYOCEAN). Les réanalyses océaniques font 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 maintenant d'un moyen unique pour décrire la variabilité océanique depuis le début de l'ère altimétrique, en termes de structure des masses d'eau et de courants. Les efforts restent néanmoins à poursuivre pour améliorer la cohérence dynamique des réanalyses (notamment dans les régions équatoriales où les performances de l'assimilation sont encore perfectibles) et des quantités intégrales diagnostiquées (e.g. Meridional Overturning Cell, MOC).

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 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 deux 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 deux communautés mais développés à échelle plus réduite, 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 (modèle communautaire reposant sur un consortium dirigé par les Etats Unis auquel participent notamment des partenaires européens - Norvège, Portugal - et la France - SHOM) 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 qui puissent s'interfacer 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 opérationnelles

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. L'extension du GMMC au côtier est une action qui n'a clairement pas atteint ses objectifs. 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.

3.4 Forces et faiblesses identifiées

Au final, les principales forces et faiblesses de notre démarche au cours des vingt 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.
- Une initiative de structuration de l'océanographie opérationnelle côtière dans Previmer qui moyennant un effort de consolidation permettra de soutenir des réponses pertinentes à la DCSMM ou l'Horizon 2020.

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, composée 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 qui ne sont pas encore en mesure d'exploiter toutes les données d'observation; ainsi, l'objectif de réanalyses et de prévisions d'excellente qualité, notamment dans les régions tropicales et les zones prioritaires (chantier Arctique), n'est pas encore atteint.
- Des perspectives d'applications biogéochimiques particulièrement variées, qui nécessitent de clarifier la feuille de route à suivre pour le développement de la filière biogéochimique.
- Une océanographie côtière opérationnelle qui, pour dépasser le stade atteint aujourd'hui, nécessitera une interface mieux construite avec son équivalent hauturier.
- 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 générique 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. contamination radioactive en mer due à l'accident de Fukushima, tempête Xynthia, pollution aux hydrocarbures dans le Golfe du Mexique, algues vertes en Bretagne) 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 prendre en compte la modélisation des apports des bassins versants et de contraindre les modèles par des techniques évoluées d'assimilation. 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 dix 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 dix à quinze 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 le long de la trace. 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 (<http://www.oceanobs09.net/>) 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 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

Démarche prospective

L'océanographie opérationnelle peut signifier un champ très vaste en termes de sciences et techniques mais aussi d'usages et de spécialités d'application. Cette notion englobe en effet des éléments qui peuvent être très spécialisés, spécifiques à un domaine d'usage ou à une technologie, et très différents de l'un à l'autre. Tous ont leur importance, mais nous nous sommes intéressés ici au champ commun à ces différents domaines, là où une approche intégrée entre les différents acteurs a le plus de sens par la mutualisation et le croisement des connaissances et les économies d'échelles induites. Cette notion de "noyau commun" a été très structurante pour l'océanographie opérationnelle française, et joue un rôle très similaire aujourd'hui au niveau européen. Cette prospective s'intéresse à cette idée de noyau commun et d'approche intégrée pour voir comment accompagner les évolutions attendues ou souhaitées de l'océanographie opérationnelle au sens large. Cette notion doit évoluer à l'avenir dans son contenu et dans ses méthodes, mais nous pensons que l'idée elle-même est un élément fort de notre stratégie pour l'océanographie opérationnelle.

L'une des conséquences est que la conduite de la prospective a été guidée par l'idée que pour l'Océanographie Opérationnelle, comme pour de nombreux autres services ou produits émergeant d'innovations technologiques avancées, c'est l'offre de service proposée qui pilote principalement la demande des utilisateurs en aval. Pour cette raison, cette prospective a cherché à cerner l'offre que l'OO pourrait proposer à cette échéance aux grands domaines applicatifs connus (voir encadré, Section 5.2), mais sans chercher à identifier précisément quels seront les utilisateurs des services de l'OO en 2025. Cette analyse plus détaillée est absolument nécessaire, mais requière probablement une prospective précise propre à chaque filière thématique ou d'application, là où l'information se spécialise et se distingue fortement d'une filière à l'autre.

Les travaux des journées de prospectives ont ensuite fait émerger les grandes lignes d'un futur système opérationnel qui permettrait de fournir l'offre proposée. La description donnée de ce système (section 5.3) est encore d'un niveau conceptuel, la forme définitive qu'il pourra prendre dépendant des moyens nécessaires, des coûts à engager et des stratégies opérationnelles respectives des organismes. Il n'est donc pas pertinent de voir le système proposé comme un système figé ou une cible très précise à atteindre.

La démarche a alors été de se baser sur les caractéristiques de ce futur système pour élaborer des recommandations sur les recherches à mener, les outils à construire, les méthodes à développer, des observations à déployer, etc., pour que sa mise en œuvre soit rendue possible. Ceci a permis d'identifier des actions de recherche prioritaires à mener (les « chantiers », section 5.4) qui permettront de favoriser le développement du futur système.

En revanche, il n'a pas semblé opportun de quantifier les coûts des orientations proposées, cet exercice, pour être pertinent, exigeant une définition plus fine du système envisagé et un premier plan d'implémentation cadré par les stratégies opérationnelles des organismes.

Enfin, certaines questions scientifiques importantes qui n'ont pas été abordées lors de la prospective (section 5.5) sont brièvement discutées.

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 de systèmes couplés à haute-résolution notamment pour la prévision du temps, 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). Météo-France développe un système couplé pour le climat et la prévision saisonnière à décennale en s'appuyant sur les produits de Mercator Océan, et a des projets de développement de systèmes couplés pour la prévision régionale qui exigeront une forte collaboration avec la communauté OO.

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 d'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 ses compétences au domaine côtier et à l'ensemble des sciences océaniques (biogéochimie, biologie, sédimentologie, halieutique, etc.); et développer 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 biogéochimie 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 relocalisables 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 (et en particulier dans un contexte de mise en œuvre de systèmes opérationnels couplés O/A).

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 est indispensable : ces communautés devront désormais s'appuyer l'une sur l'autre.

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 et consensuelle.

5.2 Contours et composantes d'un Futur Système Opérationnel Générique

La réflexion prospective a fait émerger les contours et les caractéristiques principales de ce que pourrait être un système générique d'océanographie opérationnelle intégrateur (c.a.d. fournisseur d'information de bases) permettant 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.

Ce système pourrait donc distinguer (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 des façades d'intérêt national (métropolitaine, outre mer, ...). Ce système générique devra utiliser 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. En particulier, la séparation entre un système intégrateur d'échelle régionale et un système côtier pourraient dépendre de la stratégie opérationnelle envisagée (et donc ne pas être totalement générique). Nous pensons cependant que la prospective scientifique présentée ci après reste pertinente dans un tel contexte. Cette question de séparation des échelles régionales et côtières pourrait néanmoins être cruciale lors de l'élaboration d'un plan d'implémentation.

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, bouées météo-océano ancrées, 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 nécessaire 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 de la contribution française au système global in situ d'observations des océans (GOOS) (Argo, TAO/PIRATA/RAMA, OceanSites, drifters, GLOSS, Mammifères marins, gliders) et les faire évoluer pour répondre aux nouveaux besoins de l'OO. La complémentarité avec l'observation spatiale devra être privilégiée à chaque fois que possible.
- R2. Préparer et mettre en place son extension selon les recommandations OceanObs09 vers la biogéochimie. En particulier mettre en place la nouvelle phase d'Argo (post-NAOS) avec une extension aux plus grandes profondeurs, à la biogéochimie et aux zones polaires et renforcer sa complémentarité avec l'observation spatiale. Un chantier "Argo & Observation Spatiale" pourrait être mis en place pour favoriser ces activités.
- R3. Etablir un schéma directeur du système d'observation pour chacune des échelles du système : identifier les zones ou les réseaux d'observations sont nécessaire, faibles, redondants, 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 où 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'une "Science Definition Team" et s'inspirer des travaux menés dans le cadre inter-organismes REDEO.
- R4. 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, apport des bassins versants, flottilles de pêche de type RECOPECA), lignes répétitives ferrybox et gliders en multi-paramètres probablement en partenariat avec les pays limitrophes, instrumenter au moyen de mouillages les panaches des principaux grands fleuves français, niveau de la mer et houle le long des côtes françaises) ainsi que leur coordination et coopération au sein de la structure opérationnelle et, concernant l'Europe, en lien avec les plans de surveillance de la DCSMM. Activités à inclure dans le chantier "Systèmes et Sous-Systèmes d'Observation" déjà évoqué.
- R5. Entretenir quelques sites pilotes pérennes, tout particulièrement sélectionnés à la confluence des besoins cruciaux émanant des domaines satellitaires, numériques et côtiers. Ces sites devront pour ces usages être très largement instrumentés (océan-météo, notamment) car ils répondent à une demande commune efficacement valorisée.
- R6. 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 "Systèmes et Sous-Systèmes d'Observation".
- R7. Mener une réflexion pour les systèmes relocalisables : concevoir des moyens d'observations dédiés qui puissent être rapidement déployés, déterminer sous quelle forme et avec quelle rapidité le système d'observation « fixe » peut contribuer aux systèmes relocalisables. Chantier "Systèmes et Sous-Systèmes d'Observation".
- R8. 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.

R9. Renforcer les travaux de consolidation de bases de données existantes pour les besoins de réanalyse pour étendre le produit CORA aux échelles régionales, et également à d'autres paramètres quand la couverture spatio-temporelle sera suffisante.

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,

- se construise sur la plateforme NEMO, constituée des modèles communautaires partagés par la communauté recherche et Mercator Océan,
- opère à des résolutions spatiales résolvant pleinement la mésoéchelle océanique (ce qui exige une résolution de grille proche du kilomètre à 60°N, symboliquement représentée ici par 1/36°),
- 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.

Conceptuellement, la cible visée pourrait être composée d'un système déterministe dont la haute résolution soit adéquate pour la résolution de la mésoéchelle océanique (~1/36°), associé à un système ensembliste/probabiliste de plus basse résolution permettant le développement de la mésoéchelle, (~1/12°) si nécessaire. A l'échéance 2025, le modèle physique devrait:

- inclure le couplage vent/vagues/courants,
- considérer un couplage (faible ou fort, à définir) 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 à très haute résolution et probabiliste à plus basse résolution 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

- R10. Le plan de mise en œuvre du système global, devra servir les applications opérationnelles et recherches de la mission de l'OO globale (service à Météo France, services Copernicus, etc.), et devra également contribuer à l'amélioration du système global actuel.
- R11. Le système global devra être basé sur les codes intégrés dans le système NEMO. L'investissement déjà important et particulièrement structurant de la communauté dans le développement de ces codes devra être consolidé, tant du point de vue des volets physique que biogéochimique qui devront être maintenus au meilleur niveau de l'état de l'art.
- R12. Enrichir de la physique décrite par le système afin d'en améliorer en premier lieu le forçage par l'atmosphère, grâce à la prise en compte du couplage vent/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 traiter cette recommandation en lien avec les autres composantes du système générique.

- R13. Favoriser les approches « déterministe très haute résolution » et « ensembliste ». Le système actuel qui couvre sur des systèmes globaux ou régionaux les résolutions du $1/4^\circ$, $1/12^\circ$ et $1/36^\circ$ 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.
- R14. 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 et les nouveaux produits dérivés de la couleur de l'eau).
- R15. 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 $1/36^\circ$ 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.

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 (inférieure au kilomètre 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). On peut également envisager pour ce système un couplage interactif avec un modèle atmosphérique dans un partenariat avec Météo-France.

Recommandations pour le système d'échelle régionale

- R16. Enrichissement de la physique. Les besoins concernant l'échelle régionale ont un très large recouvrement avec ceux identifiés pour l'échelle globale (voir R12) et devraient être traités dans le même chantier. Un besoin 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 couche limite atmosphérique doit être plus "intégré" (par exemple aller vers un système régional des façades métropolitaines qui soit un système intégralement couplé intégral Océan/Atmosphère exigeant développements et opérations en partenariat étroit avec Météo France).

R17. 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 $1/36^\circ$ - $1/108^\circ$. Ces questions concernent a priori tout autant les branches côtières que régionales. La recommandation est de traiter ces questions dans un chantier transverse à tous les systèmes.

R18. 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 (R15), pour créer les interfaces avec le côtier et le continent. Une interaction avec le projet AMICO qui s'intéresse à la descente d'échelle dans les modèles biogéochimiques est recommandée.

R19. 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 (R13). L'approche régionale devrait se faire sur une région où il y a suffisamment d'observations pour répondre aux questions posées (Atlantique Nord ou Nord-Est).

(*) *A ce stade il n'est pas fait de distinction entre les approches d'ensemble ou de super ensemble (approche d'ensemble multi-modèles)*

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 outre-mer, ayant des résolutions de l'ordre de la centaine 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 générique 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 relocalisation et/ou de mise en œuvre dans le cadre de partenariats de systèmes spécialisés projetables.

Recommandations pour l'échelle côtière

R20. Définir les niveaux de complexité des composantes physique/biogéochimique/sédimentologique 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 forçage par les bassins versants, ... Il faudra considérer les possibilités offertes par l'utilisation de résolutions spatiales différenciées (coarsening). Enfin, il faudra veiller à l'interface avec les surfaces continentales sous l'angle des apports.

- R21. 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.
- R22. Développer les modèles intégrés et 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 trois échelles.
- R23. Amélioration des modèles numériques. Cette recommandation est valable pour les systèmes à toutes les échelles. Pour le hauturier, dont les activités sont organisées autour du code commun NEMO géré à l'échelle européenne, il faudra veiller à assurer de bonnes interactions/coordinations avec la prospective NEMO et la suite qui sera donnée aux projets COMODO et DRAKKAR. Pour le côtier, dont les activités ne bénéficient pas d'un contexte aussi structuré, une approche fédératrice (dans l'esprit du projet COMODO) semble une réponse possible pour intégrer progressivement et proprement les méthodes de modélisation (y compris les méthodes élément finis) et les paramétrisations utilisées pour appréhender la richesse et la complexité des phénomènes et processus à représenter.

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 retréintes, et opérés par des organismes dont c'est la mission ou à des sociétés de service du secteur privé.

Recommandations

- R24. Construire, tester et évaluer un prototype interfacé aux différents systèmes généralistes sur la base des systèmes génériques d'échelle régionale et côtière
- R25. 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.
- R26. Rapprochement avec la communauté littorale.

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 supérieurs à trois ans). Le contenu et la durée d'un chantier est susceptible d'évoluer. Une coordination avec les chantiers pilotés par l'INSU (Arctique et Méditerranée) devra sans doute être mise en place.

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 est 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 R3 à R6 sur les systèmes d'observation. Un tel chantier devrait être coordonné avec le programme TOSCA du CNES.

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 les flux à l'interface air-mer, 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,...). A plus long terme, la question du couplage fort océan/vagues/atmosphère se posera, sans doute de façon plus cruciale pour les zones côtières, et il serait bon que ce chantier puisse également s'y consacrer.

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 traitera 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. Un champ nouveau dans lequel ce chantier pourrait également s'aventurer est l'assimilation de données dans un système opérationnel en couplage fort entre l'océan et l'atmosphère.

5.3.7 Chantier couplage physique/biogéochimie/biologie

Ce chantier visera à favoriser l'émergence d'une plate-forme modulaire couplée entre physique et biogéochimie qui pourra évoluer en fonction de la variété croissante des produits opérationnels à délivrer et des nouvelles approches en modélisation biogéochimique et biologique, du couplage avec le sédiment et du couplage benthopélagique nécessaires en côtier. 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.

5.4 Questions non abordées par la prospective.

De nombreuses questions scientifiques liées à la mise en œuvre opérationnelle en temps réel des systèmes intégrateurs ne sont généralement pas (ou peu) abordées dans les laboratoires de recherche. Si les chercheurs utilisent les modèles et l'assimilation pour comprendre un océan existant ou passé, ils s'impliquent peu dans les questions spécifiques traitant par exemples, de l'évaluation des analyses temps réel et des prévisions, de la définition de scores objectifs de prévisibilité pour la mesure de la qualité du système et de sa progression, ou de la pertinence de l'information que le système apporte aux acteurs sociétaux qui utilisent ses produits. L'assimilation en temps réel, qui s'appuie sur des réseaux d'observations incomplets et plus erronés qu'en temps différé, est confrontée à des problèmes spécifiques autour de l'incertitude des observations et de leur représentativité, des erreurs des forçages utilisés, problèmes qui ne sont pas abordés dans les laboratoires. Les systèmes intégrateurs opérationnels sont aussi amenés à être en interface ou couplés; à beaucoup plus de systèmes applicatifs que ce qui serait fait par ailleurs autour des thématiques de biogéochimie, d'écosystèmes et biologie marine, de sédimentologie, des processus littoraux, etc.; et à de multiples applications particulières (sécurité maritime, météorologie et climat, gestion de la ressource...). Les questions posées ces interfaçages ou couplages multiples, et bien d'autres questions scientifiques spécifiques à l'opération en temps réel pourraient être listées ici. Il faut donc constater qu'une activité de recherche interne est nécessaire au sein des structures d'OO pour répondre à des questions qui ne seront pas abordées par la communauté. GODAE/OceanView fournit cependant un cadre international à la communauté OO pour aborder ces questions.

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 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, grands groupes phytoplanctoniques).
- Le passage de la notion de système forcé à celle de couplage « faible » océan/atmosphère et à la notion de systèmes interactifs (incluant notamment le vent et les vagues) selon des méthodologies à définir.

Des défis scientifiques/chantier on 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.

7 Liste des acronymes

AGRIF: Adaptive Grid Refinement in Fortran
AISB : Association Internationale Sans But lucratif sous la loi belge
AMICO: Action vers une Modélisation Intégrée Cotière Opérationnelle,
ANR: Agence Nationale de la Recherche
ARGO: Réseau global de flotteurs profilants
ASSIM: Action thématique du programme LEFE dédiée à l'assimilation de données
BIOMER: BIOgeochemistry at MERcator ocean
CATDS: Centre Aval de Traitement des Données SMOS
CDO : Comité des Directeurs d'Organismes
CERSAT: Centre ERS d'Archivage et de Traitement
CFOSAT: Chinese-French Oceanic SATellite
CFSR: Climate Forecast System Reanalysis (NCEP)
CLPPER: Projet communautaire de modélisation hauturière des années 90
CLIVAR: Climate Variability (programme du WCRP)
CS : Conseil Scientifique
CMCC: Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici
CNES: Centre National d'Etudes Spatiales
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
COMODO: COMMunauté de MODélisation Océanique
COPERNICUS : voir GMES
CORA: Coriolis Ocean database for ReAnalysis
CORIOLIS: www.coriolis.eu.org
CPER : Contrat Plan Etat-Région
CS : Conseil Scientifique
DBCP : Data Buoy Cooperation Panel
DCSMM : Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin
DRAKKAR : Projet de coordination des activités de modélisation hauturière à haute résolution
DUACS: Developing Use of Altimetry for Climate Studies
ECCO : Estimating the Circulation and Climate of the Ocean (research consortium)
ECMWF : European Center for Medium-range Weather Forecast
ECOMF: European Center for Ocean Monitoring and Forecasting
EMODNET: European Marine Observation and Data Network
EnKF: Filtre de Kalman d'Ensemble
ERIC : European research Infrastructure for Climate
ERS : European Research Satellite
GCOM: Global Change Observation Missions (Japan)
GDR: Groupement De Recherche (CNRS)
GHRSSST: Global High Resolution SST
GIP: Groupement d'Intérêt Public
GLORYS : Global Ocean Reanalysis and Simulation
GMES : Global Monitoring for Environment and Security, nommé depuis peu Copernicus
GMES-MDD: GMES Ministère du Développement Durable
GMMC: Groupe Mission Mercator Coriolis
GOCE : Global Ocean Circulation Experiment
GODAE : Global Ocean Data Assimilation Experiment
GODAE OceanView : Suite de GODAE
GOOS: Global Ocean Observing System
GOSUD: Global Ocean Surface Underway Data project
GROOM: Gliders for Research, Ocean Observation and Management
HYCOM: HYbrid COordinate Model
IBI: Iberia-Biscay-Ireland
INGV : Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

INSU : Institut National des Sciences de l'Univers
 IPEV : Institut Paul Emile Victor
 IRD : Institut de Recherche et Développement
 JCOMM: Joint Commission for Oceanography and Marine Meteorology
 JERICO: Joint European research infrastructure network for Coastal Observatories.
 LEFE: Les Enveloppes Fluides et l'Environnement
 LIM : Louvain Ice Model
 MANU : Action thématique de LEFE dédiée aux Méthodes Mathématiques et Numériques
 MARS3D: Model for Applications at Regional Scale
 MES: Matières en Suspension
 MOOSE: Mediterranean ocean observing system on environment
 NAOS: Novel Argo Ocean observing System
 NCEP: National Center for Environmental Prediction
 NEMO: Nucleus for European Modelling of the Ocean
 OCAPI: Ocean Color Advanced Permanent Imager (Observation à haute fréquence de la couleur de l'océan dans les mers européennes).
 OCO : Océanographie Côtière Opérationnelle
 OGCM : Ocean General Circulation Model
 OO: Océanographie Opérationnelle
 ORCA: Grille globale tripolaire utilisée par NEMO
 OSI: Ocean Sea Ice SAF
 OSSE: Observing System Evaluation Experiment
 OST: Ocean Surface Topography
 PIRATA: Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic
 PISCES: Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies
 PPR: Projets en Partenariat Renforcé
 RECOPECA : Réseau de mesure de l'activité de pêche spatialisé et de données environnementales, à usage scientifique
 ROOS: Regional Ocean Observing System
 SAF: Satellite Application Facility
 SAM: Système d'Assimilation de Mercator océan
 SANGOMA: Stochastic Assimilation for the Next Generation Ocean Model Applications
 SAR: Synthetic Aperture Radar
 SEEK: Singular Extended Evolutive Kalman filter
 SMOS: Mission spatiale de l'ESA Soil Moisture and Ocean Salinity
 SOAP: Système Opérationnel d'Analyse et de Prévision du SHOM
 SOERE: Systèmes d'Observation et d'Expérimentation au long terme pour la Recherche en Environnement
 SSALTO: Nouveau Segment-Sol pour une nouvelle génération de satellites ALTimétriques pour l'Océan
 SSS: Sea Surface Salinity
 SST: Sea Surface Temperature
 ST: Science Team
 SWOT: Surface Water Ocean Topography
 SWT: Science Working Team
 TAC: Thematic Assembly Center
 TOPEX-Poséidon: satellite Franco américain qui fut entre 1992 et 2005 le premier système spatial de haute précision, dédié à l'altimétrie océanique.
 TOSCA: Groupe thématique du CNES Terre, Océan, Surfaces continentales, Atmosphère
 UKMO: UK Meteorological Office
 VAR: méthodes ensemblistes variationnelles sans adjoint
 WCRP: World Climate Research Program
 XBT: eXpandable BathyThermometer
 ZEE: Zone Economique Exclusive

8 Liste des participants

Participants aux journées bilan et prospectives de l'océanographie opérationnelle tenues au CNES (octobre 2012), à Aufrans (Janvier 2013) et à Toulouse (avril 2013).

AUCLAIR Francis	Université Paul Sabatier
ARDHUIN Fabrice	Ifremer
BAHUREL Pierre	Mercator Océan
BARNIER Bernard	CNRS - LGGE
BECKERS Jean-Marie	Université de Liège
BENSHILA Rachid	LEGOS
BERTRAND Philippe	CNRS INSU
BOONE Christine	CLS
BOURUET-AUBERTOT Pascale	LOCEAN
BOURRIN François	CEFREL - UPVD
BRASSEUR Pierre	CNRS - LEGGE
BRICAUD Clément	Mercator Océan
CHANUT Jérôme	Mercator Océan
CHARIA Guillaume	Ifremer
CHASSIGNET Eric	COAPS FSU
CHEVALLIER Matthieu	Mercator Océan
COLAS François	IRD - LOCEAN
DANIEL Pierre	Météo France
DEBREU Laurent	LJK INRIA
DELCROIX Thierry	IRD - LEGOS
DELECLUZE Pascale	Météo France
DE MEY Pierre	CNRS - LEGOS
DESROZIERS Gérald	Météo France
DEWITTE Boris	IRD - LEGOS
DOMBROWSKY Eric	Mercator Océan
D'ORTENZIO Fabrizio	Observatoire de Villefranche s/mer
DRILLET Yann	Mercator Océan
DUMAS Franck	Prévimer - Ifremer
DURAND Fabien	IRD
EBNER Pascale	CNRS - INSU
ELDIN Gérard	IRD - LEGOS
ECHEVIN Vincent	IPSL - LOCEAN
FAILLOT Mathilde	SHOM
FARCY Patrick	Ifremer
FERRY Nicolas	Mercator Océan
FONTANA Clément	LOV - UPMC
GAILLARD Fabienne	Ifremer
GARNIER Florent	MEOM, LGGE
GARRIC Gilles	Mercator Océan
GASPAR Philippe	CLS
GIORDANI Hervé	Météo France
GUINEHUT Stéphanie	CLS
GUILLON Flavien	SHOM

GUILYARDI Eric	IPSL - LOCEAN
GUTKNECHT Elodie	Mercator Océan
HERNANDEZ Fabrice	Mercator Océan
ISKANDAR Lucie	CNRS - LGGE
JOURDAN Didier	SHOM
LAGADEC Julien	SHOM
LAMBIN Juliette	CNES
LANDES Véronique	Mercator Océan
LATHUILIERE Cyril	SHOM
LAW CHUNE Stéphane	Météo France
LEBEAUPIN BOSSIER Cindy	Météo France
LEBRETON Nathanaëlle	SHOM
LECORNU Fabrice	Prévimer
LEFEBVRE Michel	Les Argonautes
LE GALLOUDEC Olivier	Mercator Océan
LELLOUCHE Jean-Michel	Mercator Océan
LEMARIE Florian	LJK - INRIA
LE TRAON Pierre-Yves	Ifremer
LE SQUERE Bruno	SHOM
LOUAZEL Stéphanie	SHOM
MARCHESIELLO Patrick	IRD - LEGOS
MARSALEIX Patrick	CNRS - Laboratoire d'aérodologie
MAYEUR Laetitia	Mercator Océan
MEMERY Laurent	Université de Brest
MOREL Yves	CNRS - LEGOS
MORROW Rosemary	CNRS - LEGOS
MOULIN Cyril	CEA
PINAZO Christel	Université de Marseille
PENDUFF Thierry	CNRS LGGE
PODAIRE Alain	Mercator Océan
POITEVIN Joël	Météo France
POULIQUEN Sylvie	Ifremer
PROVOST Christine	IPSL - LOCEAN
REDELSPERGER Jean-Luc	CNRS - INSU
REFFRAY Guillaume	Mercator Océan
REMY Elisabeth	Mercator Océan
REGNIER Charly	Mercator Océan
REVERDIN Gilles	IPSL - LOCEAN
RITCHIE Harold	Environnement Canada
SOLER Pierre	IRD
TAILLANDIER Vincent	LOV
TALAGRAND Olivier	CNRS - LMD
TESTOR Pierre	IPSL - LOCEAN
TESTUT Charles-Emmanuel	Mercator Océan
TINTORE Joachim	IMEDEA and SOCIB
TREGUIER Anne-Marie	Ifremer
TUSSEAU Marie-Hélène	Ifremer

ULSES Caroline	CNRS - Laboratoire Aérologie
VERRON Jacques	CNRS - LGGE
VON SCHUCKMANN Karina	Ifremer
WEAVER Anthony	CERFACS
ZAHARIA Raymond	Les Argonautes
ZAKARDJIAN Bruno	LSEET - Université Toulon