

Texte de la 201^e conférence de l'Université de tous les savoirs donnée le 19 juillet 2000.

L'Observation de l'Océan par Christian Le Provost

Pour rappeler le rôle fondamental de l'océan dans les grands équilibres climatiques et environnementaux de notre planète, quelques chiffres suffisent. L'Océan occupe 75 % de la surface de la Terre et contient 96 % de son eau, soit 1,4 milliards de kilomètre cubes. Cette masse d'eau gigantesque a la capacité de stocker une part importante de la chaleur solaire reçue par la Terre, et les courants océaniques transportent cette chaleur de l'équateur vers les pôles. L'océan joue ainsi un rôle de thermostat géant pour notre planète. Il transporte autant de chaleur que l'atmosphère, mais à des échelles de temps beaucoup plus longues. Alors que dans l'atmosphère le « temps » change en quelques jours, les variations dans l'océan sont beaucoup plus lentes : elles sont pluriannuelles à décennales pour l'océan de surface (les mille premiers mètres), et séculaires à millénaires pour l'océan profond.

Et pourtant, cet océan est encore bien mal connu. De ce milieu immense, essentiellement obscur, difficilement pénétrable, et donc forcément hostile, les hommes ont eu longtemps peur, mais n'ont cessé d'être fasciné. Hier source de mythes, l'océan a peu à peu révélé ses mystères, mais il reste un milieu complexe dont l'exploration scientifique n'a véritablement débuté qu'en 1872 par la plus célèbre des expéditions océanographiques : le navire Britannique Challenger prenait alors la mer pour une mission de quatre ans et allait effectuer des centaines de sondages, enregistrer la température de l'eau à diverses profondeurs, et prélever des échantillons du sol ; sous marin.

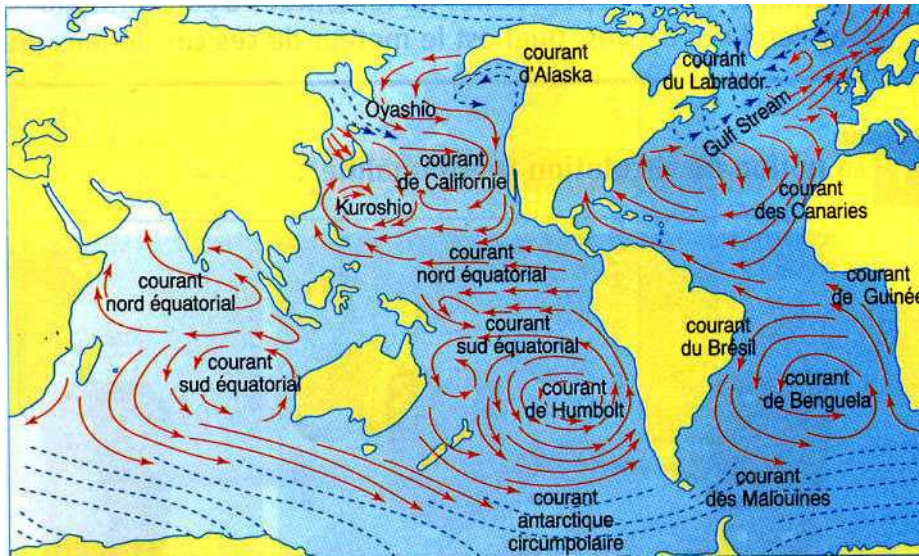
Quelques caractéristiques fondamentales de l'Océan

Aujourd'hui, nous savons observer plus aisément cet océan, et nous verrons comment un peu plus loin. Mais décrivons d'abord brièvement ce milieu très inhomogène.

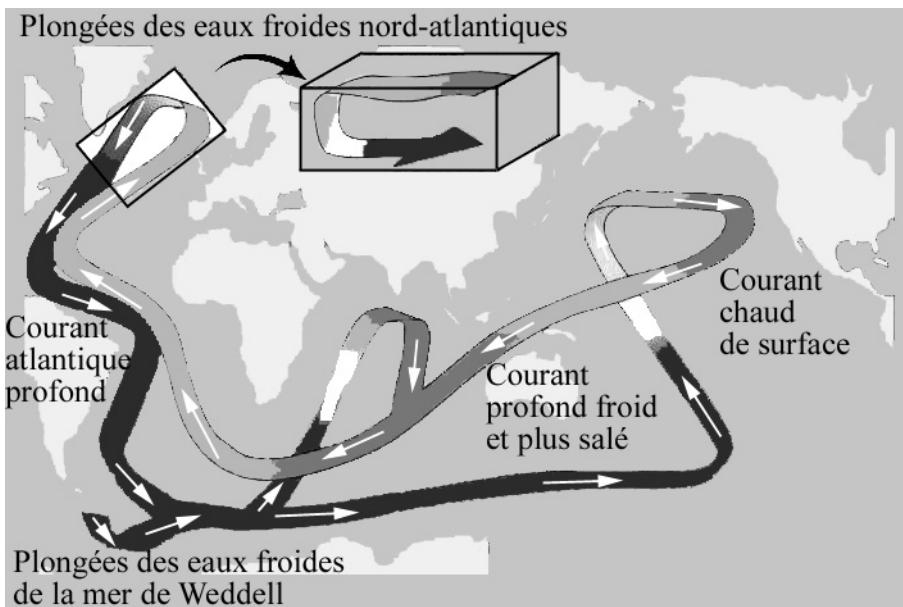
Les deux tiers de la chaleur rayonnée par le soleil sur notre planète sont emmagasinés par la mer. Il est donc logique que l'océan soit stratifié en température, avec des eaux chaudes en surface, pouvant atteindre plus de 25°C dans les zones équatoriales, et des eaux froides, voisines ou inférieures à 4°C dans ses profondeurs (en dessous de 800 à 1 000 m). Il est aussi stratifié en salinité en fonction de l'origine des masses d'eau qui composent cet océan, et donc stratifié en densité, avec des eaux plus légères en surface et des eaux plus denses dans les couches profondes. Cette stratification varie avec la latitude : les eaux sont chaudes et salées en zones tropicales, plus froides mais plus douces en provenance des pôles. Ce sont ces caractéristiques en température et salinité des masses d'eau qui permettent de caractériser leur origine : on distingue ainsi des eaux d'origine Méditerranéenne, que l'on peut suivre loin dans l'océan Atlantique entre 1 000 et 2 000 m, des eaux dites « profondes Nord Atlantique » formées en Mer de Norvège et Mer du Labrador et qui s'écoulent lentement sous les eaux de surface d'origine équatoriale transportées par le *Gulf Stream*, des eaux Antarctiques, formées dans le Courant Circumpolaire Antarctique, qui pénètrent dans les trois Océans (Atlantique, Indien et Pacifique) sous les eaux de surface tropicales, et qui se retrouvent au fond de l'Atlantique Nord et du Pacifique Nord.

L'océan est en mouvement. Il est parcouru par des courants d'amplitudes et de caractéristiques temporelles très différentes. Les courants dus aux marées et aux ondes de tempête sont intenses sur les plateaux continentaux et dominant dans les zones littorales avec des périodes caractéristiques allant de quelques heures (12 et 24 heures pour les marées) à quelques jours. Les grands courants océaniques comme le Gulf Stream (**Fig. 1**) entraînent les couches d'eau supérieures de l'océan (les 800 à 1 000 premiers mètres), principalement sous l'action du vent, avec des

échelles de temps caractéristiques de quelques années (il faut environ huit ans pour qu'une masse d'eau de surface fasse le tour de l'Atlantique Nord).



Les circulations profondes, au-dessous de la thermocline principale (800 à 1 000 m), constituent la circulation « thermohaline ». Cette circulation est forcée principalement, comme son qualificatif l'indique, par les différences de densité entre les masses d'eau, engendrées en particulier dans les zones d'échanges thermodynamiques intenses avec l'atmosphère aux hautes latitudes (Mer de Norvège, Mer du Labrador, Antarctique), mais aussi en des zones particulières comme le Golfe du Lion en Méditerranée. Ces circulations sont très lentes : elles constituent la boucle lente de la circulation océanique, très mal connue, mais dont l'échelle de temps est de l'ordre du millénaire (Fig. 2).



Le contexte international de l'océanographie moderne

L'océanographie physique moderne a été marquée au cours des années 1980 et 1990 par la réalisation de grands programmes internationaux d'observation de l'océan, sous l'égide du WRCP

(*World Research Climate Programme*). Le programme TOGA (*Tropical Ocean and Global Atmosphere*) a été dédié à l'observation et l'étude des interactions entre l'océan et l'atmosphère dans les zones Tropicales (Pacifique, Indien, Atlantique). Le programme WOCE (*World Ocean Circulation Experiment*) a mobilisé la communauté océanographique internationale pour une observation systématique de l'Océan mondial afin d'acquérir pour la première fois une connaissance véritablement globale de l'océan : la température et la salinité des masses d'eau océaniques, et la vitesse des courants, de la surface au fond, des zones équatoriales aux zones polaires. Ces programmes ont permis la mise en œuvre de moyens d'observation *in situ* à une échelle jamais atteinte auparavant, et couvert pour la première fois simultanément tous les océans. Accompagnant cet effort sans précédent d'observations *in situ*, les techniques de télédétection spatiale ont apporté une vision détaillée de l'océan de surface et de ses variations temporelles avec une précision et une résolution révolutionnaire. Parallèlement, favorisée par l'accroissement exponentiel de la puissance de calcul et de stockage des ordinateurs, cette période a été marquée par des progrès majeurs dans la modélisation de la dynamique et de la thermodynamique de l'océan et dans le développement des techniques d'inversion ou d'assimilation des observations, méthodes permettant de construire une image continue de l'océan dans ses quatre dimensions (horizontale, verticale, et temporelle – sur la période observée et analysée).

Cette discipline, l'océanographie physique, va être marquée dans la décennie qui vient par une transition de la phase d'observation exploratoire précédente vers une phase d'observation à long terme et vers la mise en place de l'océanographie opérationnelle (à l'image de ce qu'est actuellement l'observation et la prévision météorologique pour les sciences de l'atmosphère). Deux programmes se mettent en place : CLIVAR (*Climate Variability*) et GOOS (*Global Ocean Observing System*).

Le programme CLIVAR a pour objectif l'étude de la variabilité climatique à fréquences interannuelles (typiquement le célèbre phénomène El Nino), décennales (comme la NAO : *North Atlantic Oscillation*) et au-delà pluridécennales et séculaires (par exemple l'évolution à long terme du niveau de la mer). Ces études concernent tant l'amélioration des prévisions saisonnières que l'évolution du climat, et l'évaluation de l'impact des perturbations anthropiques possibles ou réelles sur notre milieu.

Le programme GOOS met en place un système d'observation de l'océan permanent et pérenne, couvrant chacun des paramètres décrivant ou contrôlant l'océan, sa physique, sa thermodynamique, et sa composition biogéochimique. Il satisfait aux besoins à long terme du programme CLIVAR. Mais il répond aussi aux besoins plus immédiats de la demande sociale pour un meilleur contrôle de notre environnement et pour une meilleure évaluation de l'impact de l'exploitation par l'homme du milieu marin : son énergie, ses ressources minérales et halieutiques, l'aménagement du littoral, l'exploitation touristique, etc.

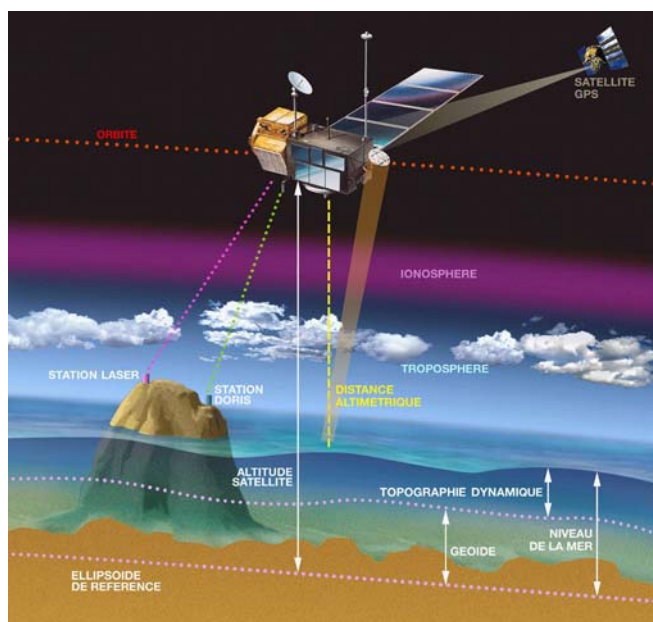
GOOS devrait favoriser la transition des programmes d'observation de l'océan du mode scientifique (c'est à dire exploratoire) vers le mode opérationnel (permanent et sur le long terme). Quand les réseaux d'observation globaux transmettront leurs observations en temps réel, les données acquises seront exploitées immédiatement : des systèmes intégrés combinant modèles mathématiques et méthodes d'assimilations permettront de produire régulièrement une image de l'état de l'océan dans ses trois dimensions, à un rythme qui variera de quelques jours à la semaine, la quinzaine ou le mois, suivant le secteur d'applications.

Les moyens d'observation

Les programmes satellitaires

Les programmes de télédétection spatiale des dix prochaines années sont déjà planifiés, et en cours de consolidation.

L'altimétrie satellitale s'est imposée (avec les missions franco-américaine TOPEX/POSEIDON et européenne ERS) comme une technique puissante et révolutionnaire d'observation de l'océan. Le dispositif est le suivant (**Fig. 3**) : le satellite survole la Terre, à son bord un radar mesure la distance « altimétrique » qui le sépare de la surface de l'océan.



L'altitude du satellite est déterminée à l'aide d'un réseau de balises distribuées à la surface de la terre : le système DORIS. La hauteur de la mer est déduite de ces deux observations avec une précision de quelques centimètres. L'altimétrie satellitale permet d'obtenir tous les 10 à 35 jours une vision quasi synoptique de la topographie de surface de l'océan, dans laquelle sont inscrites la plupart des signatures des mouvements de l'océan de surface mais aussi en profondeur : ses marées, sa réponse aux forçages atmosphériques, la composante géostrophique des courants, les ondes équatoriales et planétaires, les variations du contenu thermique, etc. Les satellites TOPEX/POSEIDON et ERS sont en fin de vie, mais la suite est déjà prévue avec les programmes JASON-1 (mission franco-américaine CNES-NASA) et ENVISAT (mission de l'ESA – Agence Spatiale Européenne), puis JASON-2, et d'autres missions qui mettront en œuvre de nouvelles générations d'altimètres tel ALTIKA, projet français en cours d'étude. Comme nous l'avons souligné, il est en effet essentiel de maintenir et d'améliorer encore les performances de ces systèmes d'observations sur le long terme, pour comprendre l'évolution de notre climat et surveiller l'évolution de notre environnement.

D'autres missions de télédétection continueront d'assurer la mesure des autres paramètres caractéristiques de l'océan de surface : la température de surface, la couleur de l'eau (en fait la concentration en phytoplancton des masses d'eau de surface), le vent à la surface de la mer, les caractéristiques des états de mer, etc. De nouvelles techniques de télédétection sont à l'étude pour observer la salinité de surface de la mer (la mission SMOS), paramètre, rappelons le, très important puisqu'il permet avec la température de déterminer la densité des masses d'eau océaniques qui se mélangent dans les grands courants océaniques. De nouvelles missions vont permettre de déterminer avec plus de précision et de détails le champ de gravité (GRACE, GOCE) dont la connaissance est actuellement insuffisante pour déterminer à partir des données altimétriques satellitaires la composante permanente de la circulation générale océanique : l'intensité du Gulf Stream dans l'Atlantique, de son équivalent dans le Pacifique : le Kuro Shivo, du Courant Circumpolaire Antarctique, etc. (**Fig. 1**).

Les programmes d'observation in situ

Paradoxalement, ces observations satellitaires sophistiquées ne nous renseignent que sur l'état de l'océan superficiel. Pour avoir connaissance de ce qui se passe dans l'intérieur des océans, il est nécessaire de poursuivre plus classiquement les observations in situ, à partir des bâtiments océanographiques, de stations autonomes fixes (retenues par le fond à l'aide de mouillages) ou dérivantes au gré des courants (**Fig. 4**). Il est programmé dans le cadre du programme CLIVAR de réaliser à intervalles réguliers de quelques années des sections hydrologiques classiques transocéaniques à partir de navires océanographiques pour « surveiller » l'évolution lente des masses d'eau océaniques. Ces sections comprendront en particulier des mesures de traceurs (oxygène, hélium, tritium, carbone 14, etc.) qui permettent de mesurer la composante lente (thermohaline) de la circulation générale océanique, en déterminant le chemin parcouru par ces traceurs à plusieurs années d'intervalle.

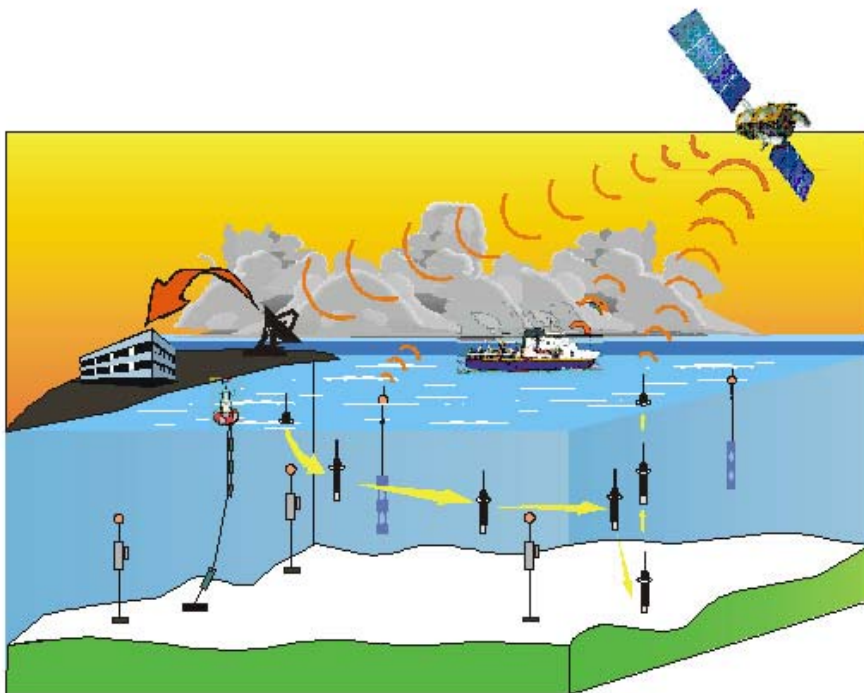


Des réseaux fixes équipés de stations autonomes ont été déployés au cours de ces dernières années. Le réseau d'observation du niveau de la mer repose sur un ensemble d'environ 300 marégraphes uniformément répartis le long des côtes et sur la plupart des îles de l'océan mondial.

Ce réseau constitue le système GLOSS (*Global Sea Level Observing System*). Deux réseaux de bouées fixes (retenues par des mouillages de grande profondeur) sont instrumentés pour mesurer les paramètres caractéristiques des échanges océan-atmosphère, la température et les courants de surface et permettre ainsi de suivre en temps réel l'évolution des océans tropicaux : le réseau TAO dans le Pacifique Équatorial, et le réseau PIRATA pour l'Atlantique Équatorial (**Fig. 5**). Un autre réseau d'observation permet d'échantillonner l'océan de surface à l'aide d'un ensemble de navires marchands qui collaborent bénévolement en effectuant des mesures de température dans les 700 premiers mètres de surface : un système judicieux (XBT) permet de mesurer des profils verticaux de température à partir d'un navire en route, d'enregistrer ces mesures à bord, et de les transmettre via un réseau de satellites de réception pour être recueillies par des centres de traitement de ces données en temps réel.

Ces réseaux vont à l'avenir être complétés par d'autres stations d'observation plus complexes basés sur des systèmes automatiques permettant de mesurer la vitesse des courants, la température, la salinité, et les principaux paramètres biogéochimiques que sont les nitrates, phosphates, silicates, oxygène, chlorophylle, ..., sur toute la colonne d'eau, de la surface au fond. Ces mesures seront effectuées avec un rythme régulier journalier et les données seront transmises en temps réel par satellite. Un exemple de telle technologie est le système français « YOYO-ANAIS ».

Nous avons noté plus haut l'importance de connaître la température et de la salinité des masses d'eau pour identifier leurs mouvements. La technique de mesure de la température et salinité a atteint désormais un niveau de fiabilité suffisant pour permettre la mise en œuvre d'un nouveau système d'observation révolutionnaire : le programme ARGO. Il va conduire à ensemençer l'océan mondial de milliers de flotteurs. Ces flotteurs intelligents dériveront à une profondeur choisie (1 000 mètres par exemple), plongeront tous les 15 jours jusqu'à 2 000 mètres et remonteront rapidement jusqu'à la surface en mesurant la température et la salinité le long de ces profils verticaux (**Fig. 6**). Les flotteurs transmettront leurs données pendant leur séjour en surface vers un système de satellites collecteurs qui les acheminera en temps réel vers des centres d'analyse. Mission accomplie, ces flotteurs replongeront sagement vers leur profondeur. Ce programme n'est pas un rêve. La communauté internationale en a prévu la mise en place pour 2003 : 3 000 flotteurs devraient alors être à la pêche sur tous les océans du globe.



On comprend que ces actions sont autant d'étapes marquantes vers le système d'observation global et permanent de l'océan dont les scientifiques ont besoin, et vers l'océanographie opérationnelle. La communauté scientifique bénéficiera de ces flots de données systématiques pour étudier comment l'océan évolue à long terme. Bien sûr, elle devra en parallèle continuer à mener des programmes d'étude dédiés à la compréhension des processus fondamentaux qui gouvernent notre océan, afin de mieux connaître le « pourquoi » de ces observations, afin d'améliorer les lois physiques, thermodynamiques et biogéochimiques exprimant en termes mathématiques cette compréhension –ce que nous appelons « modélisation » de l'océan- et afin d'être mieux à même de prédire le devenir de cet océan.

La modélisation de l'océan et l'assimilation des observations

La modélisation numérique de l'océan a considérablement progressé au cours de ces dernières années, grâce à la croissance exponentielle des moyens de calcul et aux investissements considérables des équipes de recherches. Les limitations des capacités de calcul de nos ordinateurs obligent cependant à distinguer encore deux classes de modélisation. D'une part les modélisations de « basse » résolution permettent de réaliser des simulations sur plusieurs centaines d'années, pour les études climatiques sur le long terme. D'autre part les modélisations de « haute » résolution sont limitées à des simulations de l'océan sur des périodes de quelques dizaines d'années, mais elles reproduisent les tourbillons et les fronts océaniques qui assurent les mélanges des masses d'eau.

Pour les études sur les modes de variabilité climatique et pour les simulations longues visant à une meilleure compréhension de l'évolution du climat, les modèles d'océan sont désormais couplés à des modèles de l'atmosphère, de la biosphère et de la cryosphère. Les simulations recréent le passé (jusqu'à la reconstitution des paléoclimats) et prédisent le futur. Les études de scénarios associés à l'évolution du contenu de l'atmosphère en gaz à effet de serre en sont de bons exemples.

Les modélisations à très haute résolution (inférieure à la dizaine de kilomètre) deviennent de plus en plus réalistes. Avec ces modèles, il est désormais possible d'étudier plus intimement les mécanismes d'interaction entre les courants océaniques et l'évolution de la composition biogéochimique des masses d'eau. On peut ainsi mieux comprendre leur impact sur la production primaire océanique et mieux appréhender le rôle que joue l'océan dans l'évolution du contenu en gaz carbonique de notre atmosphère.

Enfin, comme nous l'avons noté plus haut, la modélisation des zones côtières va devenir de plus en plus nécessaire pour prédire l'évolution de l'environnement littoral. Cette modélisation est complexe et va demander des efforts spécifiques pour mieux comprendre par exemple les marées et les ondes de tempête, si violentes actuellement.

La synthèse des volumes considérables de données qui seront acquises au travers des systèmes d'observation décrits plus haut, passe par l'« assimilation » de ces informations dans les modèles physiques et biogéochimiques précédemment introduits. Cette combinaison permettra à l'avenir d'obtenir régulièrement une description optimale de l'état de l'océan et de son évolution à l'échelle globale, à la moyenne échelle pour chaque bassin océanique, à l'échelle des marges continentales, et à celle des zones côtières.

Conclusions

On peut résumer en quelques mots cette rapide description de l'océanographie moderne. Essentiellement exploratoire et descriptive jusqu'au début des années 1950, l'océanographie a progressé rapidement pendant la deuxième moitié de ce siècle. Le progrès des techniques d'observation in situ, l'apport « révolutionnaire » de la télédétection spatiale, la mobilisation et

coordination des moyens à l'échelle internationale, la croissance exponentielle des calculateurs ont permis des pas de géant dans nos connaissances océanographiques.

Mais une nouvelle ère se dessine pour l'océanographie. Nous devons répondre aux interrogations sur l'évolution de notre climat, sur la protection de la qualité de notre environnement, et sur la préservation de nos ressources marines. Les réponses viendront des nouveaux programmes internationaux en préparation: CLIVAR, GOOS, GODAE (*Global Data Assimilation Experiment*). Ils vont conduire à la mise en place des réseaux d'observation nécessaires pour permettre d'observer l'océan sur le long terme. C'est un nouveau défi pour la communauté océanographique qui, à l'image de la météorologie voici vingt-cinq ans, entre dans l'ère de l'océanographie « opérationnelle ».

Légendes

Figure 1 : Les grands systèmes de courants dans les couches de surface de l'océan.

Figure 2 : La boucle lente de la circulation générale des masses d'eau océanique, appelée circulation thermohaline.

Figure 3 : TOPEX/POSEIDON

Figure 4 : Les systèmes d'observation de l'intérieur de l'océan

1 – Bouées dérivantes de surface

2 – Lignes de mouillages fixes

3 – Mesures à partir de navires océanographiques

4 – Flotteurs dérivants de subsurface

Figure 5 : Le réseau d'observation « opérationnel » des couches de surface des océans tropicaux

Figure 6 : Le système de mesure de la température et de la salinité *in situ* (système ARGO) à l'aide de flotteurs dérivants.