

Programme mondial de recherche sur le climat: réalisations, activités et défis

par Antonio J. Busalacchi¹ et Ghassem R. Asrar²

Dans le sillage de la Seconde Guerre mondiale, grâce aux progrès de notre observation et de notre compréhension de la dynamique de la circulation atmosphérique ainsi qu'aux technologies naissantes de calcul et de télécommunications numériques, s'inaugurait le nouveau domaine de la prévision météorologique numérique. Les avantages de ces découvertes scientifiques et innovations techniques pour la société apparaissent clairement aujourd'hui dans les prévisions météorologiques courantes, journalières et hebdomadaires.

Aujourd'hui, grâce aux progrès de la science du climat au cours des 30 dernières années, nous faisons des avancées majeures dans notre aptitude à prévoir la variabilité saisonnière à interannuelle du climat de la terre et à projeter le changement climatique sur des échelles séculaires pour les grandes régions du monde. Si l'on se tourne vers l'avenir, nous nous trouvons au début d'une nouvelle ère de prévision du comportement du système-Terre, avec un énorme potentiel pour satisfaire les besoins de la société mondiale en informations climatiques et environnementales à l'échelle journalière ou saisonnière, annuelle ou décennale et même à plus longue échéance. La coordination et la collaboration entre les nations du monde

ont été et continueront d'être un signe important de ces progrès.

Le Programme mondial de recherche sur le climat (PMRC) a été établi en 1980 sous le parrainage conjoint de l'OMM et du Conseil international pour la science (CIUS) et, depuis 1993, de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO. Les principaux objectifs du PMRC, depuis sa naissance, sont de déterminer la prévisibilité du climat et de déterminer l'incidence des activités humaines sur le climat. Ces objectifs fondamentaux ont établi la base des travaux préparatoires de notre société actuelle sur les stratégies d'adaptation et d'atténuation des effets du changement climatique. Grâce aux efforts du PMRC, il est maintenant possible aux climatologues de suivre, simuler et projeter le climat mondial pour que les informations climatiques puissent être utilisées pour la gouvernance, dans la prise de décision et à l'appui d'une vaste gamme d'applications pratiques.

Au cours de ces 30 années, de nouvelles disciplines des sciences climatiques ont vu le jour: elles transcendent les domaines traditionnels des sciences de l'atmosphère, de l'océan et de la Terre et ont conduit à des prévisions systématiques du climat saisonnières à interannuelles, ainsi qu'à des prévisions du climat à plus longue échéance. Parallèlement à ces études des fluctuations naturelles du système climatique couplé, l'élaboration dans le cadre du PMRC de modèles

climatiques couplés, dont l'élément moteur est constitué par les changements du forçage radiatif des émissions de gaz à effet de serre, a fourni les projections du changement climatique qui constituent la base des évaluations du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et du Programme des Nations Unies sur l'évaluation de l'appauvrissement/rétablissement de l'ozone atmosphérique.

Réalisations passées

La science climatique moderne a commencé avec la création de modèles numériques, à base physique, des circulations atmosphériques et océaniques dans les années 50 et 60. Dans les années 60 et 70, les observations recueillies par de nouveaux satellites placés en orbite terrestre, apparemment à l'appui de la prévision météorologique, ont commencé à fournir une perspective sans précédent de la Terre vue comme un système interconnecté de l'atmosphère, des océans, des continents et de changements à vie et temporels de ce système, perspective beaucoup plus longue que celle des phénomènes météorologiques journaliers.

Cette première perspective globale de la circulation atmosphérique et du système climatique de la Terre a permis des études du climat mondial et a mis en lumière les importants processus physiques du système climatique. L'idée d'un programme international de recherche sur l'évolution du climat a vu le jour au huitième Congrès météorologique

1 Directeur, Earth System Science Interdisciplinary Center, Université du Maryland, College Park, (États-Unis).

2 Directeur, Programme mondial de recherche sur le climat, OMM.

mondial en mai 1979, au cours duquel le PMRC a été officiellement mis en place, y compris une composante de recherche sur le climat (à être gérée conjointement par l'OMM et le CIUS) et des activités de collecte, de gestion et d'application de données climatiques et d'évaluation des incidences potentielles de l'évolution du climat [à être gérés par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE)]. Le PMRC, dès le départ, suivait deux axes majeurs: la prévisibilité du climat et l'influence humaine.

Le PMRC a défini la complexité et l'étendue scientifiques du système climatique: le plan scientifique pour le programme, préparé en 1984, a reconnu clairement le rôle du rayonnement, des nuages, de l'océan, du cycle hydrologique et de la biosphère. Les océans, les surfaces terrestres, la cryosphère et la biosphère avaient tous besoin d'être représentés de manière réaliste dans des modèles climatiques mondiaux. L'ampleur de l'élaboration de modèles et de l'expérimentation numérique exigeait que l'on étudie la sensibilité du climat aux changements de la concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère (ainsi que celle d'autres gaz et aérosols). Les premiers travaux sur l'évaluation de la recherche sur les effets du dioxyde de carbone sur le climat ont devancé les besoins du GIEC. Vu le rôle critique des océans dans le système climatique, une coopération étroite a été établie avec les océanographes, et la COI a adhéré au PMRC comme coparrain en 1993.

La première initiative couplée atmosphère/océan, le projet d'études des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe (TOGA), a commencé en 1984: on a étudié l'influence de l'inertie thermique à variation lente des océans tropicaux sur la circulation atmosphérique à grande échelle. La reconnaissance de l'échéance temporelle ou mémoire plus longue inhérente aux océans a permis des prévisions climatiques à court terme au-delà de l'échéance de la prévision météorologique journalière. Le besoin d'observations océaniques pour initialiser les prévisions couplées a établi le prototype du système d'observation des océans maintenant en place.

Au cours de la décennie du projet TOGA, des observations courantes de l'interface air-mer et de la structure thermique des couches supérieures de l'océan dans l'océan Pacifique tropical ont été fournies en temps réel par le réseau TAO (*Tropical Atmosphere Ocean*). Ces observations au moyen de mouillages ont depuis été poursuivies dans le bassin Pacifique et étendues aux océans Atlantique et Indien, mettant ainsi en place un fondement solide pour le système actuel d'observation des océans.

L'assimilation des données océaniques s'est révélée un élément clef de l'initialisation des prévisions climatiques saisonnières à interannuelles. Les modèles de prévision couplés océan-atmosphère ont été mis en œuvre dans un grand nombre des principaux centres de prévisions météorologiques du monde (figure 1). Il en est résulté des avancées clefs dans les prévisions climatiques saisonnières, fondées sur des observations, la compréhension et la modélisation d'anomalies mondiales dans la circulation atmosphérique globale, des schémas de températures et de précipitations liés à El Niño par des téléconnexions. C'était là le début du concept des produits et services climatiques.

En outre, l'approche d'ensemble de la science climatique a évolué pendant le projet TOGA. Avant celui-ci, dans le début et jusqu'au milieu des années 80, les océanographes et les météorologues

étaient souvent dans des communautés séparées et distinctes. Dans le cadre du projet TOGA, ils se sont réunis pour former une nouvelle discipline de science climatique, en se rendant compte qu'il y a des modes de variabilité qui surviennent dans le système couplé océan/atmosphère qui n'existent pas dans le système non couplé océan ou atmosphère.

Tout comme le projet TOGA a laissé un héritage qui a servi au programme ultérieur d'études sur la variabilité et la prévisibilité du climat (CLIVAR), l'Expérience mondiale concernant la circulation océanique (WOCE) du PMRC a constitué un fondement solide pour l'étude du rôle des océans dans le climat. Le programme WOCE a été le plus grand et le plus réussi des programmes mondiaux de recherche sur les océans jamais entrepris: entre 1990 et 1997, il a recueilli des données océanographiques d'une qualité et d'une couverture sans précédent; fournies par plus de 30 nations, ces données ont été fondamentales dans l'élaboration de modèles océaniques à l'échelle du bassin et ont étayé notre compréhension actuelle des processus de mixage pour l'énergie et les nutriments dans les océans. Le programme WOCE a laissé une forte empreinte sur notre connaissance des océans mondiaux, des changements dans la technique utilisée par les océanographes et des changements généraux dans les méthodes scientifiques de recherche océanique. Pendant le programme, une perspective globale de

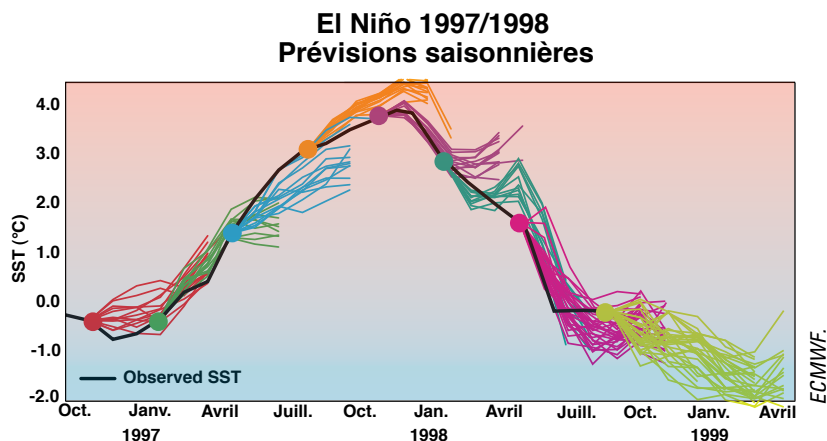


Figure 1 — Une démonstration de prévisions ENSO réussies comme celles qui sont indiquées ici pour l'événement 1997/1998 a été possible grâce aux efforts intensifs de recherche dans le domaine de la prévision saisonnière. La base physique de la compréhension et de la prévision des signaux de température El Niño et des changements associés dans la circulation atmosphérique mondiale d'une saison à une année à l'avance a été établie lors du projet PMRC sur l'étude des océans tropicaux et de l'atmosphère du globe (TOGA, 1985-1994).

la nature évolutive des océans du monde dans le temps, de haut en bas, a été élaborée.

Le concept d'une circulation océanique générale régulière ou approche «instantanée» de l'observation de l'océan a été réfuté par les sections répétées de l'étude hydrographique mondiale du WOCE. Cette étude a établi une ligne de base pour évaluer les changements dans le temps et évaluer les effets anthropiques sur la circulation océanique. En partenariat avec l'étude conjointe des flux océaniques mondiaux réalisée par les États-Unis, une étude du dioxyde de carbone et de la chimie des traces a été entreprise. Les études du processus régional ainsi que des campagnes d'observation ciblées ont amélioré notre connaissance de l'océan méridional, de la formation en eaux profondes dans les mers de Groenland-Islande-Norvège et du Labrador, ainsi que notre compréhension de la circulation thermohaline mondiale et du transport méridional de chaleur de l'Équateur vers le pôle.

Les progrès de la technologie océanique ont joué un rôle majeur pour permettre une perspective océanique globale. Des observations continues de la hauteur de la surface de la mer mondiale ont été fournies par les altimètres radars des satellites TOPEX Poséidon et ERS. Des capteurs satellitaires à ondes actives et passives ont fourni par tout temps des lectures de la vitesse du vent à la surface de l'océan. L'amélioration des instruments et de l'étalonnage a conduit à plus de précision dans les mesures du flux air-mer à partir de plates-formes placées tant à bord de navires que sur des bouées. Dans l'océan, le programme WOCE a mené au programme ARGO et au concept du déploiement global de flotteurs profileurs. Des dispositifs expérimentaux comme les glisseurs ont démontré la possibilité de réaliser des sections répétées dans des régions de l'océan historiquement difficiles à observer comme les courants à limites occidentales.

Grâce aux efforts des spécialistes du WOCE en matière de modélisation et aux progrès de l'informatique, on dispose maintenant de modèles océaniques

mondiaux qui peuvent résoudre les courants énergétiques aux limites et les processus d'instabilité qui leur sont associés et fournir une description dynamiquement uniforme de nombreux aspects observés de la circulation océanique qui contribuent à la compréhension du rôle des océans dans le système climatique de la Terre. Le programme WOCE a aussi changé la façon dont les chercheurs étudient le rôle de l'océan dans le climat. L'idée d'une synthèse de l'océan dans laquelle des observations *in situ* ou des observations par télédétection sont rassemblées grâce à des méthodes d'assimilation de données a révolutionné l'approche de l'océanographie globale. Des observations de l'océan global en temps réel ont fait naître la possibilité d'une océanographie opérationnelle à l'échelle mondiale, thème important de la prochaine Conférence de 2009 sur l'observation des océans (Venise, Italie, septembre 2009). Nous en sommes au point où l'équivalent océanographique d'une Veille météorologique mondiale n'est pas une folie limitée par la logistique mais, en fait, une réalité imminente.

Activités actuelles

D'autres initiatives importantes du PMRC ont été le Projet international d'étude climatologique des systèmes nuageux par satellite, en 1982, la compilation d'un jeu de données du bilan radiatif à la surface de la terre, de 1985, et le Projet mondial de climatologie des

précipitations, en 1985. Ces initiatives reposaient sur des nouvelles techniques passionnantes, élaborées pour marier des observations par télédétection optimale et des observations *in situ*, offrant pour la première fois de nouvelles connaissances du rôle des nuages dans le système climatique et l'interaction des nuages tant avec le rayonnement qu'avec le cycle hydrologique. Ces activités ont été le point de départ de l'exhaustive Expérience mondiale sur les cycles de l'énergie et de l'eau (GEWEX) mise en place en 1988, qui est encore l'une des plus vastes expériences mondiales sur les cycles de l'énergie et de l'eau. À ce titre, le projet GEWEX conduit les études du PMRC sur la dynamique et la thermodynamique de l'atmosphère, les interactions de l'atmosphère avec la surface de la Terre (en particulier au-dessus des terres) et le cycle mondial de l'eau. L'objectif du projet GEWEX est de reproduire et de prévoir, au moyen d'observations et de modèles appropriés, les variations du régime hydrologique global, son impact sur la dynamique de l'atmosphère et de la surface terrestre, et les variations des processus hydrologiques et les ressources en eau à l'échelle régionale et leur réaction aux changements de l'environnement, comme l'augmentation des gaz à effet de serre.

Le GEWEX s'efforce de fournir une amélioration substantielle de l'aptitude à modéliser la précipitation et l'évaporation mondiales, ainsi qu'à évaluer précisément

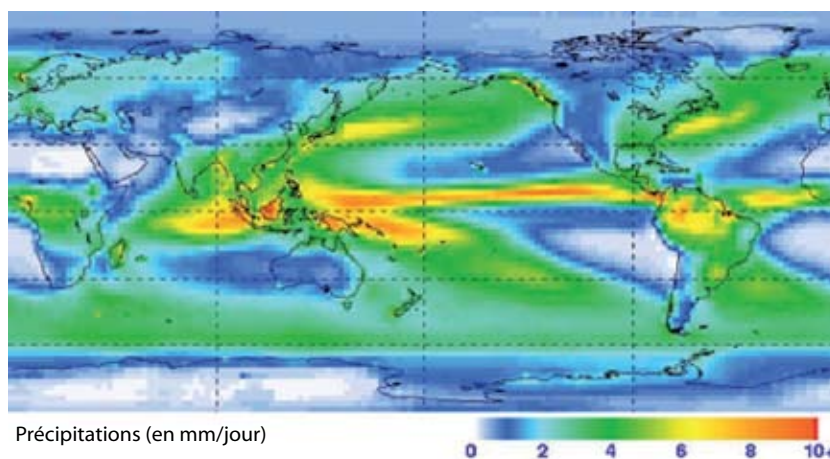


Figure 2 — La moyenne arithmétique pour les 30 années 1979-2008, en millimètres par jour, du produit de précipitations combinées à l'aide d'instruments par satellite du Projet mondial de climatologie des précipitations du GEWEX. Données fournies par le GEWEX/GPCP; image de David Bolvin (SSAI), 5 Juin 2009, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD.

la rétro-information entre le rayonnement atmosphérique, les nuages, l'utilisation des terrains et l'évolution du climat. Jusqu'ici, le GEWEX a élaboré des modèles à haute résolution de prochaine génération de la surface hydrologique continentale et du climat régional en améliorant les paramétrisations et en les appliquant à des prédictions expérimentales. Il a aussi élaboré des ensembles de données mondiales sur les nuages, le rayonnement, les précipitations et autres paramètres qui sont précieux pour comprendre et prévoir les processus des cycles mondiaux de l'énergie et de l'eau, et pour leur représentation appropriée dans des modèles de système climatique (figure 2). Des études de modélisation et des expériences coordonnées sur le terrain ont identifié des processus clefs terre-surface et des conditions qui contribuent de manière extrêmement importante à la prévisibilité des précipitations. Des systèmes d'assimilation des données sont actuellement mis au point dans le cadre du GEWEX qui permettront de déterminer à des résolutions aussi fines que 1 km les caractéristiques de la surface des terres émergées, ce qui se révélera extrêmement utile pour l'étude et pour l'évaluation de la variabilité et de l'évolution du climat régional.

Le programme relatif à la variabilité et à la prévisibilité du climat (CLIVAR), fondé en 1995, est l'axe principal du PMRC pour les études de la variabilité du climat. Les moussons, l'oscillation australe El Niño et d'autres phénomènes mondiaux couplés atmosphère/océan sont étudiés par le CLIVAR aux échelles saisonnières, interannuelles, décennales et séculaires. Le CLIVAR s'appuie sur les constatations des projets réussis TOGA et WOCE du PMRC. Le CLIVAR va plus loin et examine la détection et l'attribution de l'évolution anthropique du climat sur la base de relevés climatologiques de haute qualité.

La mission de ce programme est d'observer, de simuler et de prévoir le système climatique de la Terre, en se concentrant sur les interactions océan/atmosphère permettant une meilleure compréhension de la variabilité, de la prévisibilité et de l'évolution du climat, dans l'intérêt

de la société et de l'environnement dans lesquels nous vivons. Le CLIVAR cherche à encourager l'analyse des observations des variations et de l'évolution du climat sur des périodes saisonnières à séculaires et à de plus longues échelles. Il collabore étroitement avec le projet GEWEX dans l'étude et, *in fine*, dans la prévision des systèmes de mousson de par le monde. Il encourage également et aide à coordonner les études d'observation des processus climatiques, en particulier pour l'océan, mais également au-dessus des zones continentales de mousson, en encourageant leur introduction dans des améliorations des modèles.

Le CLIVAR encourage la mise en place d'un système durable d'observation des océans aussi bien à l'échelle régionale qu'à l'échelle mondiale. En collaboration avec d'autres projets du PMRC, il essaie en particulier de comprendre et de prévoir le comportement couplé de l'atmosphère, à évolution rapide, et de la surface terrestre, des océans et des mers de glace, dont l'évolution est plus lente, à mesure que ces éléments s'adaptent aux processus naturels, aux influences humaines et aux changements de la chimie et du biote de la Terre, tout en améliorant les estimations des changements de climat d'origine anthropique ainsi que notre compréhension de la variabilité du climat.

Le CLIVAR fournit un apport scientifique aux questions intersectorielles qu'étudie le PMRC sur la prévision à l'échelle saisonnière et décennale et (avec le GEWEX) sur les moussons et les phénomènes climatiques extrêmes. Il concourt également aux études sur l'évolution climatique d'origine anthropique et la chimie atmosphérique [avec les Processus stratosphériques et leur rôle dans le climat (SPARC)] et la variabilité et l'évolution au niveau de la mer [avec le projet relatif au Climat et à la cryosphère (CliC)] ainsi qu'aux thèmes climatiques scientifiques pluridisciplinaires. On compte au nombre des réalisations du CLIVAR la contribution à l'amélioration de la compréhension et de la prévision de la variabilité et de l'évolution du climat.

Le CLIVAR a assuré la coordination des expériences de scénarios de modèles

de climats pour le GIEC et a contribué de manière substantielle au quatrième rapport d'évaluation du GIEC sur les changements des phénomènes climatologiques extrêmes. Des activités d'intercomparaison de modèles visant à améliorer les prévisions saisonnières et les performances des modèles océaniques ont été menées par le CLIVAR. L'étude du rôle des océans dans le climat a été l'axe principal de la coordination d'études sur le terrain afin d'aider à améliorer les méthodes de paramétrisation pour les modèles climatiques atmosphériques et océaniques, la synthèse des données océaniques et la préconisation d'observations océaniques en temps réel et d'observations différées de haute qualité pour les opérations et les recherches océaniques.

Le CLIVAR a organisé d'importants ateliers de formation sur la prévision saisonnière en Afrique, les incidences du climat sur les écosystèmes océaniques, les données climatologiques et les phénomènes extrêmes et l'oscillation australe El Niño. Un exemple précis est l'élaboration d'un atlas climatique de l'Afrique, qui servira d'outil pour la recherche sur le climat du continent.

Depuis 1993, le rôle de la stratosphère dans le système climatique terrestre a été au cœur du projet du PMRC relatif au SPARC. Le projet SPARC se concentre sur l'interaction des processus dynamiques, rayonnants et chimiques de l'atmosphère. Les activités organisées par le SPARC comprennent la construction d'une climatologie de référence pour la stratosphère et l'amélioration de la compréhension des tendances de la température, de l'ozone et de la vapeur d'eau dans la stratosphère. Les processus d'ondes de gravité, leur rôle dans la dynamique stratosphérique et comment ceux-ci peuvent être paramétrés dans les modèles sont d'autres sujets en cours.

Des recherches sur les interactions stratosphère/troposphère ont conduit à une nouvelle compréhension des changements de la température troposphérique initiés depuis la stratosphère. Le SPARC a organisé des simulations et analyses de modèles qui ont constitué un élément

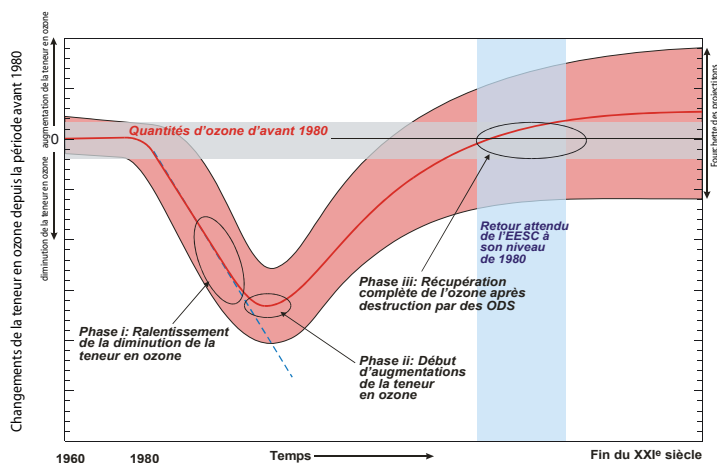


Figure 3 — Par le biais du projet sur les Processus stratosphériques et leur rôle dans le climat (SPARC), des scientifiques liés au PMRC siègent au sein du Groupe OMM/PNUE de l'évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone en qualité d'auteurs principaux, de contributeurs et de relecteurs. Le diagramme schématisé montre l'évolution temporelle des quantités d'ozone mondiale observées et attendues. Graphique repris de: OMM/PNUE: Évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone: 2006.

central des évaluations scientifiques OMM/PNUE de l'appauvrissement de la couche d'ozone et maintenant de son rétablissement (figure 3). Des experts affiliés au SPARC ont siégé au Comité directeur d'évaluation OMM/PNUE, comme auteurs principaux, contributeurs et relecteurs. En outre, des rapports complets du SPARC, évalués par des pairs ont traité des sujets suivants: «Tendances dans la répartition verticale de l'ozone», «Vapeurs d'eau dans les couches supérieures de la troposphère et de la stratosphère», «Intercomparaison des climatologies de l'atmosphère moyenne», et «Propriétés des aérosols

dans la stratosphère». Des chercheurs du PMRC ont aussi fortement contribué à la base scientifique pour les protocoles relatifs à l'ozone et les scénarios d'émissions de dioxyde de carbone et d'aérosols, utilisés par la Convention-cadre des Nations Unies sur le changement climatique (CCNUCC).

En 1993, l'Étude du système climatique de l'Arctique (ACSYS) a ouvert une perspective polaire avec l'examen de processus clés dans l'Arctique qui ont un rôle important dans le climat mondial. La portée de cette étude a été élargie à

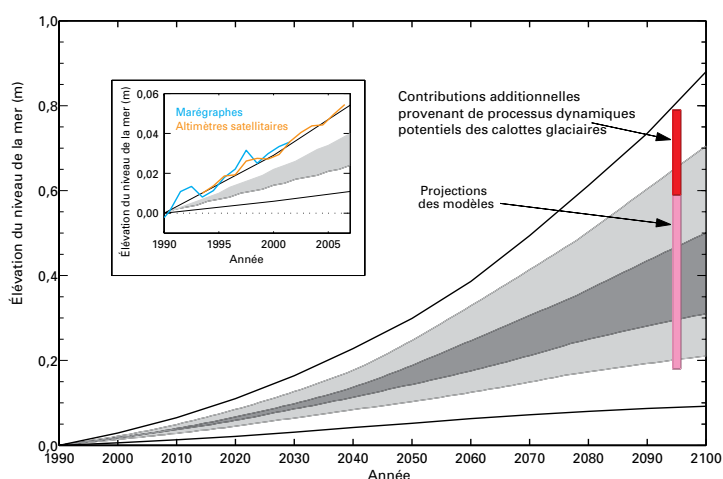


Figure 4 — La connaissance et la compréhension du climat que nous tirons de la recherche doivent être mises à la disposition des décideurs de manière ouverte et opportune afin qu'elles soient bénéfiques à la société humaine et à l'environnement. Par exemple, les évaluations de la vulnérabilité des zones côtières habitées et terres de basse altitude comme les îles du Pacifique et autres États insulaires sujets à une élévation du niveau de la mer sont fondées sur l'élévation du niveau de la mer reconstruite et projetée pour le XXIe siècle(m). Une nouvelle activité du PMRC, dans le cadre du projet relatif au Climat et à la cryosphère (CliC) est maintenant axée sur l'évaluation de la contribution des calottes glaciaires et des glaciers au niveau mondial de la mer. Graphique modifié et actualisé par J. Church, repris de Church et al. 2001, dans le quatrième rapport d'évaluation du GIEC.

l'ensemble de la cryosphère mondiale avec la mise en place du projet relatif au Climat et à la cryosphère (CliC) en 2000. Le CliC a été établi afin de stimuler, d'appuyer et de coordonner la recherche sur les processus par lesquels la cryosphère interagit avec le reste du système climatique. La cryosphère est composée des portions gelées du globe et comprend les inlandsis, calottes glaciaires, icebergs, glaces de mer, couverture neigeuse et chutes de neige, pergélisols et sols gelés en saison, ainsi que la glace de lacs et glace de rivières. En tant que composante sensible du système climatique, la cryosphère fournit des indicateurs clés du changement climatique (par exemple l'élévation du niveau de la mer; figure 4), et le CliC se concentre sur l'identification de schémas et de taux de changements dans les paramètres cryosphériques. Le CliC comprend quatre thèmes, couvrant les domaines suivants de la science du climat et de la cryosphère: la cryosphère terrestre et l'hydrométéorologie des régions froides, les masses de glace et le niveau de la mer, la cryosphère marine et le climat, et la prévision globale de la cryosphère.

Le CliC a suscité une forte participation des chercheurs sur le climat au Programme scientifique de l'année polaire internationale 2007/08: cet apport comprenait le concept d'un instantané satellitaire du pôle visant à obtenir une couverture sans précédent des deux régions polaires. Le CliC a été l'un des programmes scientifiques clés qui ont appelé l'attention de la communauté scientifique mondiale sur la cryosphère. Pour la première fois, un chapitre sur la neige, la glace et le sol gelé a été rédigé pour le quatrième rapport d'évaluation du GIEC. Comme il est écrit dans ce chapitre, la contribution de l'eau fondue au récent changement du niveau de la mer est maintenant connue avec une précision considérablement accrue.

L'élaboration et l'évaluation de modèles climatiques mondiaux constituent un composant fédérateur important du PMRC, se basant sur les progrès scientifiques et techniques dans les activités plus orientées sur la discipline. Ces modèles sont l'outil fondamental

pour la compréhension et la prévision des variations naturelles du climat et la fourniture des prévisions fiables du changement naturel et anthropique du climat. Les modèles sont également un moyen essentiel d'exploiter et de synthétiser, de manière synergétique, toutes les données pertinentes sur l'atmosphère, l'océanographie, la cryosphère et la surface terrestre qui sont recueillies dans le PMRC et d'autres programmes. Le Groupe de travail sur l'expérimentation numérique (WGNE), conjointement parrainé par le PMRC et la Commission pour les sciences atmosphériques de l'OMM (CAS), conduit l'élaboration de modèles atmosphériques pour les études climatiques et la prévision météorologique numérique.

Le programme de modélisation du PMRC a fourni un apport essentiel aux quatre évaluations publiées du GIEC et apportera une fois de plus sa contribution à la prochaine série d'évaluations du GIEC. Le Groupe de travail des modèles couplés (WGCM) du PMRC conduit l'élaboration de modèles couplés océan/atmosphère/terre utilisés pour les études climatiques à des échéances plus longues. Le WGCM est également le lien du PMRC avec l'analyse, l'intégration et la modélisation du système terrestre du Programme international géosphère/biosphère (PIGB) et le GIEC. Les activités dans ce domaine se concentrent sur l'identification des erreurs dans les simulations de modèles du climat et l'exploration des moyens de leur réduction en organisant des expérimentations coordonnées de modèles dans des conditions normalisées. Dans le cadre du PMRC, le Projet d'intercomparaison des modèles atmosphériques a facilité des simulations contrôlées par 30 modèles atmosphériques différents dans des conditions spécifiées. La comparaison des résultats avec les observations a révélé la capacité de nombreux modèles à représenter de manière adéquate les états saisonniers moyens et la variabilité interannuelle à grande échelle.

De plus, le WGCM a lancé une série de projets de comparaison de modèles couplés (CMIP). En 2005, le PMRC a facilité la collecte, la conservation et l'accès à toutes les simulations de modèles du

climat mondial entreprises pour le quatrième rapport d'évaluation du GIEC. Cette troisième phase du CMIP (CMIP3) a mis en jeu un ensemble inédit d'expériences du changement climatique coordonnées du XX^e et du XXI^e siècle provenant de 16 groupes dans 11 pays avec 23 modèles climatiques couplés mondiaux. Environ 31 téraoctets de données de modélisation ont été recueillies dans le cadre du Programme pour le diagnostic et l'intercomparaison des modèles climatiques. Les données de modélisation sont librement disponibles et ont été vues par plus de 1 200 experts qui ont rédigé jusqu'ici plus de 200 notes revues par des pairs.

Le premier atelier de prévision saisonnière du PMRC s'est tenu en juin 2007 à Barcelone (Espagne) et a réuni des chercheurs sur le climat, des fournisseurs de prévisions et des experts en applications pour étudier l'état actuel de la prévision saisonnière et l'application des prévisions saisonnières par les décideurs. Des participants ont ébauché des recommandations et identifié les meilleures pratiques dans la science de la prévision saisonnière. Au cours de l'atelier, le projet de prévisions historiques du système climatique du PMRC a été lancé. Ce projet est un cadre expérimental multimodèle et multi-institutionnel pour évaluer l'état de la science des systèmes de prévision saisonnière et pour évaluer le potentiel de prévisibilité non encore utilisé en raison d'interactions de composantes du système climatique qui ne sont actuellement pas pleinement prises en compte dans les prévisions saisonnières.

Le Sommet mondial de modélisation pour la prévision du climat, conjointement patronné par le PMRC, l'IGBP et le Programme de recherche sur le climat mondial de l'OMM (6-9 mai 2008, Reading, Royaume-Uni) a été organisé afin d'élaborer une stratégie pour révolutionner la prévision du climat au cours du XXI^e siècle, le but étant d'aider à faire face à la menace du changement climatique. Un résultat clef du sommet a été la reconnaissance indiscutable que notre aptitude à passer des études de la variabilité et du changement du climat mondial à l'application au niveau régional a d'énormes

répercussions pour les modèles climatiques, observations et infrastructure nécessaires, maintenant et dans l'avenir, comme par exemple l'informatique haute performance.

Tout au long de son histoire, le PMRC a eu des interactions élargies avec de nombreux groupes travaillant sur la recherche sur le climat et a largement collaboré avec d'autres organisations scientifiques internationales sur des aspects de la recherche sur le climat qui mettent en jeu la biogéochimie ainsi que la physique. De nombreux exemples de collaboration active entre le PMRC et l'IGBP peuvent être trouvés dans les projets GEWEX, SPARC et CLIVAR. En outre, le PMRC a fortement appuyé la mise en place par l'OMM du Système mondial d'observation du climat (GCOS) en 1992, en coopération avec le CIUS, le PNUE et la COI. Le PMRC est également coparrain du Système international d'analyse, de recherche et de formation (START) sur le changement global, qui encourage les capacités de recherche environnementale dans les pays en développement. En 2001, les projections de futurs changements climatiques éventuels et de variations accrues du climat ont stimulé l'établissement du partenariat pour la science du système terrestre entre le PMRC, le PIGB, le Programme sur les dimensions humaines internationales et le Programme international de recherche scientifique sur la biodiversité, DIVERSITAS. Ce partenariat préconise une approche coordonnée sur des questions mondiales importantes d'intérêt commun, à savoir le bilan carbone, les systèmes alimentaires, les systèmes hydrologiques et la santé humaine et d'importants thèmes analogues concernant les activités humaines qui pourraient être touchées par d'éventuels changements climatiques futurs et une variabilité accrue du climat.

Obstacles et possibilités pour l'avenir

Si l'on se tourne vers l'avenir, le cadre stratégique du PMRC pour 2005-2015 vise à faciliter l'analyse et la prévision de la variabilité et du changement du système terrestre en vue de leur utilisation dans une gamme croissante d'applications

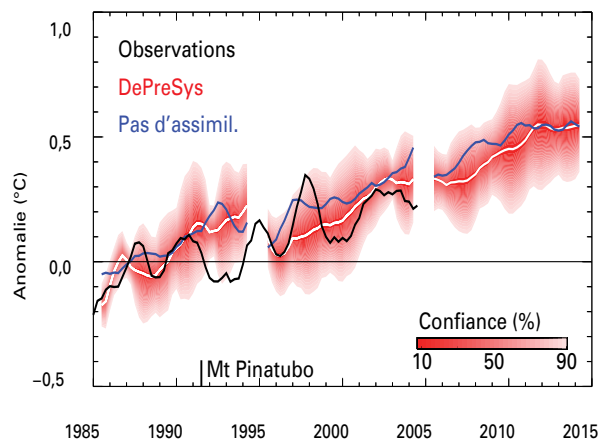
pratiques qui sont directement pertinentes, bénéfiques et valables pour la société. Un objectif clef de ce cadre stratégique concerne la prévision en continu du temps, du climat et, *in fine*, de l'ensemble du système terrestre. Il y a de nombreuses raisons théoriques et pratiques pour que cette approche soit poursuivie par météorologues et climatologues dans l'adoption d'une approche intégrée ou unifiée de la prévision environnementale.

L'extension de la prévision climatique à une prévision environnementale plus vaste exige d'admettre que le système climatique est inextricablement lié à la biogéochimie de la Terre et aux activités humaines. Pour que le PMRC atteigne ses objectifs de compréhension et de prévision de la variabilité et du changement du climat et leur effet sur la société dans son ensemble, il doit participer et participera à des études du système terrestre pleinement intégré.

Développer une approche unifiée de la prévision du temps, du climat, de l'eau et de l'environnement exige une perspective élargie du système terrestre qui va au-delà des disciplines des sciences atmosphériques traditionnelles. L'élaboration de la prévision climatique et, en fin de compte, de la prévision environnementale, n'est pas une simple extension de la prévision météorologique numérique. Par exemple, les disciplines scientifiques requises pour appuyer la prévision du temps, du climat et de l'environnement selon ces échelles de temps recouvrent la météorologie, la chimie atmosphérique, l'hydrologie, l'océanographie et les écosystèmes marins et terrestres.

Si la prévision atmosphérique immédiate et la prévision météorologique à très court terme sont principalement des problèmes de valeurs initiales, l'extension à la prévision météorologique à court et moyen termes et à plus longue échéance commence à mettre en jeu le couplage des processus terre-surface et le rôle de la rétroaction de l'humidité du sol et autres processus surface-atmosphère. La prévision à long terme au moyen de la prévision météorologique saisonnière comprend le couplage atmosphère-océan avec les conditions initiales de la mémoire

Figure 5 — Anomalies de température moyenne annuelle à la surface, par rapport à la moyenne globale (1979-2001) prédites par le système de prévision décennale (DePreSys) du Bureau météorologique du Royaume-Uni à compter de juin 2005. L'intervalle de confiance (en ombré rouge) à partir de l'écart-type par rapport à la moyenne de l'ensemble (courbe blanche). La courbe bleue est une prévision équivalente sans initialisation avec des observations. La courbe noire est la prévision a posteriori à compter de juin 1985, avec des observations. Repris de: Smith et al. (2008, Science 317).



inhérente dans les couches supérieures de l'océan, menant à une capacité prédictive à plus longue échéance.

La prévision climatique décennale est déterminée à la fois par les valeurs initiales et le forçage des valeurs limites. À ces échelles temporelles, des informations sur les couches plus profondes de l'océan et les changements du forçage radiatif des gaz à effet de serre et des aérosols jouent des rôles déterminants. Lorsque l'on considère les projections climatiques interdécennales à séculaires, il faut prendre en compte non seulement les futures concentrations de gaz à effet de serre, mais également les changements de la couverture terrestre/végétation dynamique et le piégeage du carbone, régis à la fois par les écosystèmes marins et terrestres. En outre, des informations prédictives spécifiques aux régions seront requises pour toutes ces échelles temporelles pour les paramètres environnementaux comme la qualité de l'air et de l'eau.

L'une des principales difficultés du PMRC est de déterminer les limites de la prévisibilité à l'échelle décennale. Dans le cadre du concept d'une suite unifiée de prévisions, la prévision décennale fait le pont entre la prévision de la variabilité et du changement du climat à l'échelle saisonnière à interannuelle et les projections des changements du climat dus à des facteurs externes sur de très longues périodes, c'est-à-dire un siècle. Les spécialistes du changement climatique se concentrent d'habitude sur le problème de l'estimation du changement climatique

induit par des facteurs anthropiques sur des échelles de temps séculaires. Pour eux, la fourniture de conditions initiales précises n'est pas une préoccupation majeure, puisque le niveau de prévisibilité de la première catégorie est jugé faible sur des échelles séculaires.

En revanche, bien que les spécialistes de la prévision météorologique numérique et de la prévision saisonnière aient des schémas d'assimilation de données bien élaborés pour déterminer les conditions initiales, les modèles n'incorporent pas bien des processus cryosphériques et biogéochimiques dont on pense qu'ils sont importants à des échelles pluriséculaires. Si ces deux groupes mettent l'accent sur la prévision décennale, cela pourrait contribuer à accélérer l'élaboration de schémas d'assimilation de données dans les modèles du système terrestre et l'utilisation de modèles du système terrestre pour la prévision à plus courte échéance, par exemple saisonnière. À titre d'exemple, les prévisions saisonnières peuvent être utilisées pour étalonner les projections probabilistes du changement de climat dans un système de prévisions en continu. Il y a donc une base commune sur laquelle peut reposer une coopération des deux écoles de spécialistes afin de mettre au point des prévisions unifiées.

Ces 20 dernières années, le lien entre les efforts du PMRC en matière d'observation et de modélisation a consisté en des réanalyses des données atmosphériques, qui ont grandement amélioré notre aptitude à analyser la variabilité

passée du climat. La troisième Conférence internationale du PMRC sur la réanalyse (Tokyo, 28 janvier-1^{er} février 2008) a témoigné des résultats des progrès dans les produits et la recherche de réanalyse et a examiné les objectifs et développements futurs. Les relevés climatologiques sont constitués des analyses d'observations recueillies à de nombreuses autres fins, comme la prévision du temps dans l'atmosphère ou la recherche océanographique de base. Il est maintenant reconnu que le climat mondial ne peut être compris qu'en veillant à ce que des observations climatologiques de qualité soient faites dans l'atmosphère, l'océan et sur la surface de la Terre, y compris dans la cryosphère.

Une conséquence des pratiques passées est que les relevés climatologiques montrent souvent des distorsions qui occultent les variations à long terme. De nombreux ensembles de données sur le climat ne sont pas homogènes: soit la période d'enregistrement des données est trop brève pour fournir des renseignements à l'échelle décennale, soit l'enregistrement n'est pas uniforme, en raison de changements dans l'exploitation et de l'absence de métadonnées adéquates. Par conséquent, des efforts majeurs ont été nécessaires pour homogénéiser les données observées pour qu'elles soient utiles aux fins du climat. La réanalyse des observations atmosphériques, au moyen d'un modèle constant d'assimilation perfectionné, a aidé énormément à rendre l'enregistrement historique plus homogène et plus utile pour de nombreuses études. De fait, dans les 20 années qui se sont écoulées depuis que la réanalyse a été initialement proposée, notre aptitude à générer des estimations temporellement homogènes et de grande qualité du climat passé a fait des avancées considérables. Le PMRC et le SMOC ont été au premier rang de la promotion des besoins de recherche et d'observations de base en vue de la réanalyse. L'essor actuel de l'analyse et de la réanalyse dans les domaines des océans, de la terre et de la glace des mers ouvre de vastes possibilités de nouveaux progrès et de connaissance améliorée des données sur le climat du passé.

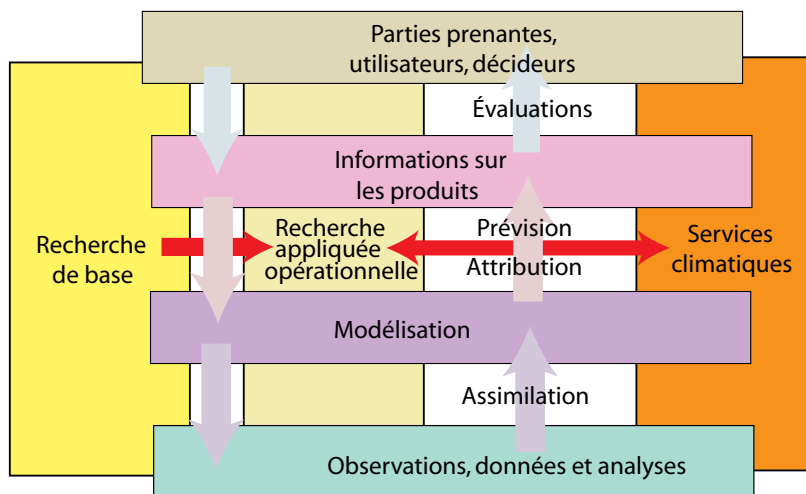


Figure 6 — Cadre conceptuel d'un système d'information climatique qui commence par des observations, de la recherche et de l'analyse et aboutit aux renseignements requis par les décideurs. Les décisions concernant les priorités et la coordination entre les composantes du système reposent sur le besoin de comprendre des scientifiques et sur le type d'information climatique dont les décideurs ont besoin. Repris de: Trenberth (2008), Bulletin OMM 57 (1), janvier 2008, légèrement modifié par G. Asrar

Les travaux de la Conférence de Tokyo ont montré qu'il reste beaucoup à faire pour étudier les questions en suspens sur les réanalyses, et en particulier celles qui portent sur la base changeante des données d'observation. Ces questions ont un effet négatif sur la variabilité décennale et à plus longue échéance, et limitent actuellement les applications des réanalyses. En outre, alors qu'à l'origine la réanalyse a porté sur le climat et le temps atmosphériques, il y a eu d'importantes études de réanalyse (ou de synthèse) des données sur les océans. En raison du manque de données historiques sur les océans, il a fallu élaborer des techniques nouvelles pour augmenter l'homogénéité de la réanalyse des données océaniques. D'autres développements prometteurs surviennent dans le domaine de la réanalyse des données sur la glace de mer, l'Arctique et la surface terrestre. Il y a également eu la mise au point initiale de l'assimilation de données sur le couple atmosphère/océan, qui constitue le fondement des futures études de réanalyses couplées qui pourront éventuellement mener à des représentations plus uniformes des cycles de l'énergie et de l'eau. Un obstacle toutefois: améliorer les estimations de l'incertitude des produits de réanalyse.

La réanalyse des données sur l'atmosphère mondiale aboutit à des estimations de haute qualité et uniformes des variations à court terme ou à l'échelle

synoptique de l'atmosphère, mais la variabilité sur de plus longues échelles (en particulier à l'échelle décennale) n'est pas aussi bien rendue par les réanalyses actuelles. Les causes principales de cette anomalie sont la qualité et l'homogénéité des jeux de données de base qui constituent l'enregistrement des données climatiques et la qualité des systèmes d'assimilation de données utilisés pour produire les réanalyses. La recherche sur les corrections du biais et les techniques avancées de réanalyse est certes prometteuse, mais des efforts supplémentaires de réanalyse sont nécessaires. À l'avenir, il sera important que les réanalyses mondiales de prochaine génération soient coordonnées et, si possible, échelonnées afin de s'assurer que les enregistrements de données d'observation de base sont améliorés avant chaque réanalyse, pour que l'on ait le temps d'analyser les résultats des efforts passés et d'en tirer des leçons. D'autres améliorations des réanalyses, et notamment leur élargissement afin d'y inclure les constituants clés présents à l'état de traces et les domaines des océans, de la terre et de la glace marine, sont encourageantes pour l'extension de l'utilisation des réanalyses aux études, recherches et applications dans le domaine du changement climatique.

La fourniture de renseignements climatiques à l'échelle régionale est un autre obstacle pour les chercheurs en climatologie. En effet, les investisseurs, les

dirigeants d'entreprises, les responsables de ressources naturelles et les décideurs en ont besoin pour faire face aux conséquences néfastes du changement climatique potentiel sur les industries, les communautés, les écosystèmes et des nations entières (figure 6). Les moyennes mondiales mesurées de la température, des précipitations et de l'élévation du niveau de la mer conviennent pour suivre l'évolution du climat mondial, mais de nombreux secteurs de la société ont besoin d'informations pratiques à des échelles spatiales considérablement plus réduites. La confiance accrue avec laquelle on attribue les changements climatiques à l'échelle mondiale à des émissions de gaz à effet de serre induites par l'homme, et la prévision selon laquelle ces changements augmenteront à l'avenir, a conduit à une augmentation de la demande de prévisions du changement climatique à l'échelle régionale pour servir de base à l'adaptation. Même s'il existe une certaine confiance dans les schémas à grande échelle des changements de certains paramètres, la capacité prédictive à l'échelle régionale est beaucoup plus limitée et en fait difficile à évaluer, vu que nous ne disposons pas, pour une sélection de climats différents, de données sur lesquelles tester les modèles.

Beaucoup de recherches visent à améliorer les prévisions des modèles mais les progrès seront vraisemblablement lents. Entre-temps, le PMRC reconnaît que les pouvoirs publics et les entreprises sont confrontés à la nécessité de prendre des décisions maintenant et qu'ils ont besoin des meilleurs conseils clima-

tiques disponibles aujourd'hui. En dépit de leurs limitations, les modèles de climat offrent les moyens les plus prometteurs de fournir des informations sur le changement climatique et le PMRC encourage la mise à disposition de données tirées des prévisions climatiques pour guider les décisions, à condition que les limitations de ces prévisions soient clairement énoncées. Cela inclura des évaluations de l'aptitude des modèles utilisés à prédire le climat actuel et la portée des prévisions à partir d'un nombre aussi vaste que possible de modèles différents.

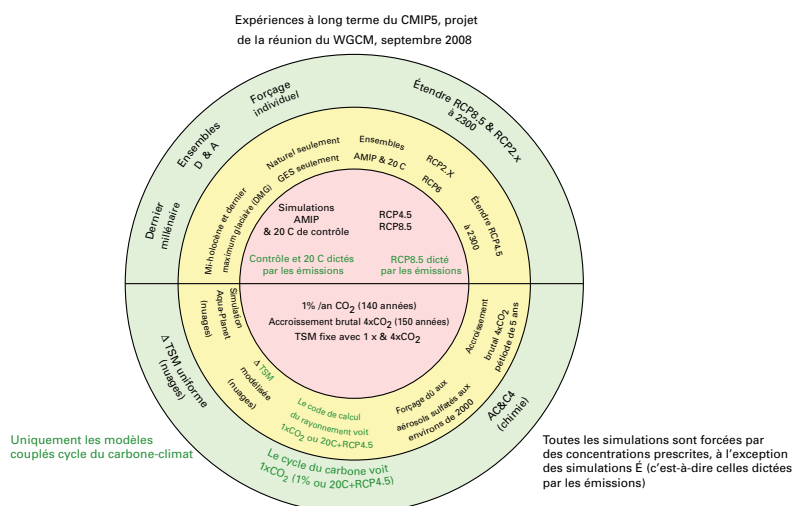
À cette fin, le PMRC a commencé à élaborer un cadre pour évaluer des techniques de conversion du climat à l'échelle régionale (RCD) en vue de leur utilisation dans la conversion des prévisions du climat mondial (Giorgi et al., 2009). Un tel cadre serait conceptuellement analogue aux intercomparaisons réussies de modèles couplés qu'a réalisées le PMRC et aurait pour objectif de quantifier la performance des techniques de modélisation du climat régional et d'évaluer leurs mérites relatifs. Un effort international coordonné est envisagé pour développer des techniques de conversion améliorées et fournir des indications aux spécialistes de la modélisation du climat mondial. Un objectif spécifique sera la production d'informations climatiques haute résolution améliorées, fondées sur une RCD multimodèle, portant sur des régions dans le monde entier, afin de les intégrer dans le travail sur l'impact et l'adaptation et dans le cinquième rapport d'évaluation du GIEC (RE5). Cela faciliterait des interactions plus grandes

entre les modélisateurs du climat, ceux qui produisent les informations converties et les utilisateurs finals, afin de mieux appuyer les activités sur l'impact et l'adaptation et de mieux communiquer l'incertitude scientifique inhérente aux projections du climat et aux informations climatiques. Un important thème de cette activité sera la plus grande participation d'experts de pays en développement.

Au cours des quelques années à venir, le PMRC continuera d'être l'avant-garde scientifique des principales activités internationales d'évaluation du climat. Actuellement, sous la conduite du Groupe de travail des modèles couplés du PMRC, la cinquième phase du CMIP (CMIP5) est en cours d'élaboration, pour appuyer le cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Le grand défi du nouvel ensemble de modèles examinés à CIMP5 est de résoudre les changements climatiques régionaux, en particulier au cours des prochaines décennies, auxquels les sociétés humaines devront s'adapter, et de quantifier l'ampleur des rétroactions dans le système climatique, comme par exemple dans le cycle du carbone.

La communauté scientifique a formulé les expérimentations coordonnées proposées pour CMIP5 afin de répondre aux questions scientifiques clefs. Puisque ces expériences seront l'activité majeure des spécialistes de la modélisation du changement climatique international au cours des prochaines années, les résultats pourront être évalués par le cinquième rapport d'évaluation du GIEC. La nouvelle suite d'expériences de modèles

Figure 7 — Le PMRC et le Programme international Géosphère-Biosphère ont uni leur savoir-faire pour stimuler l'élaboration de modèles climatiques et donc les moyens de prévision. Les futures activités de modélisation du climat comprennent un ensemble d'expériences qui «comparent» les modèles climatiques actuels et évaluent leurs forces et faiblesses et améliorent les simulations climatiques, en utilisant une suite définie de scénarios d'émissions. Après incorporation du cycle mondial du carbone, des modèles plus complexes du système Terre sont également en cours d'essai aux fins d'évaluation de leur réaction à divers forçages. Au sein du PMRC, le Groupe de travail des modèles couplés conduit la mise au point de modèles couplés océan-atmosphère-terre utilisés pour les études climatiques à plus longue échéance. Repris de: Taylor et al. (2008).



couplés est fondée sur l'utilisation de deux classes de modèles pour étudier deux échéances temporelles et deux ensembles de questions scientifiques. Pour les projections à plus longue échéance (jusqu'à 2100 et au-delà) (figure 7) et en prolongement des modélisations précédentes du WGCM à l'appui du GIEC, des modèles climatiques couplés de résolution intermédiaire (≈ 200 km) incorporeront le cycle du carbone, la chimie spécifiée/simple et les aérosols, forcés par de nouveaux scénarios d'atténuation (désignés sous l'appellation «profils représentatifs d'évolution de concentration»). Les questions scientifiques à étudier portent sur l'ampleur des rétroactions dans le système climatique couplé. Des scénarios d'atténuation et d'adaptation comportant des niveaux d'émissions admissibles qui permettent de stabiliser la concentration à certains niveaux doivent être utilisés (au lieu du précédent rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions). Les nouveaux scénarios prévoient d'emblée des mesures de politique générale qu'il sera nécessaire de prendre afin de pouvoir répondre à l'évolution future des changements climatiques. Puisque nous ne pouvons atténuer qu'une partie des problèmes et que nous devons nous adapter aux autres, le défi consiste à utiliser des modèles climatiques pour quantifier les changements climatiques régionaux évoluant dans le temps et auxquels les sociétés humaines devront s'adapter.

Un nouveau domaine sur lequel se concentrera le CMIP5 est un ensemble de projections à très court terme, qui comprennent des études de prévisions à échéance de 10 et 30 ans et des expériences haute résolution sur des tranches de temps, dont un résumé figure dans Taylor et al., 2008. Les recherches du PMRC ont indiqué qu'on peut raisonnablement espérer produire des prévisions décennales d'une maîtrise suffisante pour être utilisées par les planificateurs et les décideurs tout en étant d'un intérêt scientifique considérable. Le concept expérimental CMIP5 fournit l'occasion d'une coordination internationale de la recherche et de l'expérimentation dans ce domaine.

Il y a deux aspects au problème décennal: le signal forcé par des facteurs externes (gaz à effet de serre et aérosols, volcans, activité solaire, etc.) et la partie prévisible du signal généré à l'interne par des mécanismes océaniques intrinsèques, des processus couplés océan-atmosphère, la modulation des modes de variabilité du climat (par exemple l'oscillation australe/El Niño) et, potentiellement, par des processus terrestres et cryosphériques. Jusqu'ici, les projections climatiques ont généralement traité la variabilité interne comme une composante statistique de l'incertitude. Bien qu'il n'y ait pas de pic décennal marqué dans le spectre du système climatique, des échéances longues existent et sont potentiellement prévisibles. La difficulté des études de prédiction/prévisibilité est d'identifier les mécanismes associés aux régions/modes de prévisibilité, de mieux comprendre la connexion entre les modes océaniques et la variabilité du climat terrestre, et d'étudier la capacité prédictive au moyen de prévisions décennales pronostiques (y compris multimodèle).

Les résultats d'études de prévisibilité et des démonstrations de capacité prédictive fournissent les fondements du lancement d'une étude coordonnée du PMRC sur la prévision/prévisibilité décennale. Il existe d'abondantes occasions scientifiques d'améliorer et d'étendre les modèles, et de procéder à l'analyse de la variabilité et des modes de variabilité. Les défis futurs comprennent la nécessité de développer des méthodes d'analyse améliorées, en particulier dans l'océan et pour l'initialisation, la vérification et le développement de modèles, ainsi que dans la production d'ensembles et l'utilisation d'ensembles de possibilités multimodèle pour la prévision aux échelles décennales.

En plus du soutien qu'il apporte au processus d'évaluation du GIEC, le PMRC continuera d'appuyer l'Évaluation quadriennale de la couche d'ozone par l'OMM et le PNUE. L'activité de validation du modèle de chimie climatique (CCMVal) du SPARC est la principale analyse fondée sur un modèle pour la connexion entre la chimie et le climat atmosphériques. Le CCMVal fournit un soutien stratégique

de modélisation au processus d'évaluation de l'ozone prescrit par le Protocole de Montréal. L'ozone est un composant majeur des processus radiatifs et est également affecté par la dynamique et le transport. Seuls les CCM peuvent simuler la rétroaction des processus chimiques sur la dynamique et le transport des gaz présents à l'état de traces.

Sous la conduite du WCRP SPARC, des simulations CCM seront faites dans le cadre d'une contribution majeure à l'Évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone OMM/PNUE: 2010. L'accent sera principalement mis sur la validation du modèle par rapport aux observations, ainsi que sur des évaluations du développement futur de l'ozone stratosphérique. Actuellement, on s'attend à ce que la reconstitution de la couche d'ozone ait lieu au milieu du siècle (WMO, 2007; Eyring et al., 2007), époque à laquelle on prévoit que la colonne d'ozone atteindra les valeurs de 1980 dans les latitudes polaires australes. Cette évolution est due d'une part à une diminution des substances qui réduisent la teneur en ozone, et d'autre part à une réduction des températures stratosphériques due à des concentrations accrues de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, réduction qui a une incidence sur la formation des nuages stratosphériques polaires et la destruction de l'ozone hétérogène.

Il importe de savoir comment l'évolution des concentrations troposphériques de substances nocives pour l'ozone se répercute sur les substances chimiques destructrices de la couche d'ozone dans la stratosphère. Des processus dynamiques qui contrôlent le transport et les questions dynamiques liées à la formation et au maintien des vortex doivent être soigneusement pris en compte lorsqu'on prévoit l'évolution à long terme de la couche d'ozone polaire. Les influences des modifications de l'ozone stratosphérique et de sa composition sur le climat terrestre qui ont besoin d'être évaluées comprennent celles qui peuvent avoir un effet sur la composition de la troposphère. Pour des études du développement futur de l'ozone stratosphérique, il est très important de tenir

compte des interactions du rayonnement, de la dynamique et de la composition chimique de l'atmosphère.

En résumé, le PMRC a fait de grands progrès pour faire avancer la compréhension du système climatique couplé sur des échelles de temps saisonnières à séculaires. Les efforts de recherche du PMRC ont abouti à faire des prévisions, produits et services climatiques opérationnels une réalité. Le PMRC a joué un rôle majeur dans le transfert des informations et connaissances scientifiques qui en résultent sur le système climatique terrestre pour les décisions de politique générale à travers le GIEC, la Conférence des parties à la CCNUCC et son Organe subsidiaire sur les avis scientifiques et technologiques. Plus de la moitié des contributions scientifiques et techniques utilisées dans les évaluations du GIEC ont été fournies par des scientifiques affiliés au PMRC. Ce dernier a fait un effort concerté pour fournir un accès mondial aux prévisions ou projections et résultats de recherche de ses modèles, en vue de leur utilisation par les scientifiques des pays en développement et des pays les moins avancés, pour évaluer les conséquences de la variabilité et du changement potentiel du climat sur les grands secteurs économiques (par exemple l'alimentation, l'eau, l'énergie, la santé), pour leurs pays ou la région géographique.

Les réalisations et progrès du PMRC ont tous été possibles grâce aux contributions généreuses et soutenues de ses parrains: l'OMM, le CIUS et la COI, et leur réseau de plus de 190 pays membres. La communauté du PMRC toute entière se réjouit de ce parrainage et de cet appui; elle nourrit beaucoup d'espoir quant aux nombreuses occasions qui permettent de faire avancer de manière significative la compréhension des causes et conséquences des changements et de la variabilité du climat, l'évaluation de leur impact sur des secteurs majeurs de l'économie mondiale et la possibilité d'utiliser le savoir ainsi obtenu pour gérer les risques associés à ces changements, dans l'intérêt de notre génération, de nos enfants et de ceux qui les suivront au cours de ce siècle et au-delà.

Les travaux du PMRC ont établi, sans équivoque, que le système terrestre connaîtra de réels changements climatiques au cours des 50 prochaines années, qui dépasseront l'ampleur de la variabilité naturelle du climat. Une question d'importance primordiale à laquelle sont confrontées les nations est de savoir comment s'adapter à cette certitude de la variabilité et du changement du climat au cours du prochain demi-siècle. Faire face à la variabilité du climat et s'adapter au changement climatique sont donc de véritables enjeux pour la société. En réponse, la prochaine et troisième conférence sur le climat mondial étudiera comment des services climatiques exhaustifs éclaireraient au mieux les décisions concernant l'adaptation.

Fournir des observations et des services climatiques exige un travail croisé entre la recherche fondamentale, la recherche appliquée, les opérations, les applications, ainsi que l'engagement avec la communauté des usagers. Cependant, le gros de l'effort déployé jusqu'à présent a été concentré sur le système climatique physique et n'a pas été axé sur les produits. Toutefois, les impacts et services climatiques font intervenir des secteurs comme les affaires, la finance, l'agriculture, l'ingénierie, la santé publique, la politique des pouvoirs publics, la sécurité nationale, etc. Afin de satisfaire les besoins de la société en matière de services climatiques, un système d'information climatique est réclamé par les décideurs pour appuyer la prise de décisions au niveau politique, budgétaire et d'investissement. Un tel système s'appuierait sur des prévisions climatiques fiables couvrant des échelles de temps saisonnières à décennales, des prévisions adaptées aux régions et localités, l'intégration des données atmosphériques, océaniques, terrestres et sociales dans un modèle de prévisions complet du «système Terre» et des interfaces décision-appui qui peuvent être ajustées afin de fournir aux utilisateurs des scénarios du type «si..., alors...».

La mise en œuvre d'un système d'information climatique exigera le couplage de modèles qui engloberont le système climatique physique, les cycles

biogéochimiques et les systèmes socio-économiques, la synthèse de jeux de données disparates à partir d'observations *in situ* et à partir de l'espace, de nouveaux systèmes de capteurs terrestres et en orbite, une infrastructure et un logiciel informatiques dédiés à haute performance et une synergie sans précédent entre la communauté des chercheurs climatologues, les fournisseurs opérationnels des services climatiques, et les utilisateurs finals. Tout comme il y a 60 ans, lors de la naissance de la prévision météorologique numérique, nous nous trouvons aujourd'hui à l'aube d'une nouvelle ère d'informations et de services climatiques étayés par des recherches climatiques qui s'efforcent d'améliorer, d'étendre et d'affiner notre compréhension du système climatique couplé et notre aptitude à le prévoir.

Bibliographie:

- CHURCH, J.A., J. M. GREGORY, P. HUYBRECHTS, M. KUHN, K. LAMBECK, M.T. NHUAN, D. QIN et P.L. WOODWORTH, 2001: Les changements du niveau de la mer. Dans: *L'évolution du climat (2001): La base scientifique*. Contribution du Groupe de travail I au troisième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
- EYRING, V., D.W. WAUGH, G.E. BODEKER, E. CORDERO, H. AKIYOSHI, J. AUSTIN, S.R. BEAGLEY, B. BOVILLE, P. BRAESICKE, C. BRÜHL, N. BUTCHART, M.P. CHIPPERFIELD, M. DAMERIS, R. DECKERT, M. DEUSHI, S.M. FRITH, R.R. GARCIA, A. GETTELMAN, M. GIORGETTA, D.E. KINNISON, E. MANCINI, E. MANZINI, D.R. MARSH, S. MATTHES, T. NAGASHIMA, P.A. NEWMAN, J.E. NIELSEN, S. PAWSON, G. PITARI, D.A. PLUMMER, E. ROZANOV, M. SCHRANER, J.F. SCINOCCA, K. SEMENIUK, T.G. SHEPHERD, K. SHIBATA, B. STEIL, R. STOLARSKI, W. TIAN et M. YOSHIKI, 2007: Multimodel projections of atmospheric ozone in the 21st century, *J. Geophys. Res.*, 112, D16303, doi:10.1029/2006JD008332.
- GIORGI, F., C. JONES et G. ASRAR, 2009: L'expérience CORDEX: répondre aux besoins d'information climatologique à l'échelle régionale. Dans le présent *Bulletin*, 175-183.
- OMM 2007: Évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone: 2006, Projet mondial de recherche et de surveillance concernant l'ozone – Rapport N° 50; Genève, Suisse, 572 p.
- TAYLOR, K.E., R.J. STOUFFER et G.A. MEEHL, 2008: Résumé de la conception de l'expérience CMIP5. http://www.clivar.org/organization/wgcm/references/Taylor_CMIP5.pdf
- TRENBERTH, K.E., T. KOIKE et K. ONOGI, 2008. Progress and prospects for reanalysis for weather and climate, *Eos*, 89, 234-235.