



<http://www.clubdesargonautes.org>

Le changement climatique : histoire et enjeux

Jacques Merle, Bruno Voituriez, Yves Dandonneau,
Club des Argonautes

Novembre 2013

Chapitre VI : Les dynamiques de l'atmosphère et de l'océan se rejoignent

Il est difficile d'identifier des repères temporels significatifs de tournants historiques dans une aventure aussi complexe que celle de la découverte du changement climatique dans toutes ses dimensions, scientifiques, économiques, sociales, humaines et politiques.

On vient de parcourir les pièces du puzzle scientifique depuis l'*Année Géophysique Internationale* (1957-1958) jusqu'aux années 1980 et déjà des convergences se sont amorcées parmi des disciplines scientifiques voisines.

On a vu que l'étude des dynamiques de l'atmosphère et de l'océan, initiées par l'*OMM*, étaient déjà étroitement associées depuis la création du *GARP* en 1974 et la prise de conscience par les *atmosphériciens* de la nécessité de prendre en compte l'océan pour comprendre l'atmosphère globale et progresser dans la prévision.

Aussi il n'est pas surprenant que les deux premières pièces du puzzle climatique susceptibles de s'emboîter rapidement aient été celles des dynamiques de l'atmosphère et de l'océan liées par des interactions à leur interface commune.

1 - La programmation de la recherche sur le climat

On a vu précédemment que les météorologues comprirent les premiers la nécessité de collecter, organiser et standardiser les observations de l'atmosphère et du temps pour satisfaire la demande publique de sa prévision quotidienne. Pendant longtemps cette prévision relevait surtout de l'expérience et de l'habileté des prévisionnistes en faisant usage des observations dont ils disposaient. Pour parfaire cette prévision et allonger son échéance, il devint nécessaire de s'appuyer sur des séries d'observations plus étendues dans le temps mais surtout dans l'espace.

L'échange des observations avec celles des régions et des États voisins s'imposa nécessitant des organisations au niveau national, puis international.

C'est ainsi que fut créée en 1873 une «*Organisation Météorologique Internationale – OMI*» qui devint en 1951 une agence technique des Nations Unies, l'«*Organisation Météorologique Mondiale – OMM*».

Mais rapidement pour répondre à la demande des utilisateurs, les services météorologiques durent encore étendre l'échéance de leurs prévisions passant de 24 heures à 48 heures, puis 72 heures, ... voire une semaine. Pour cela ils durent progressivement prendre en compte les milieux connexes de l'atmosphère, principalement l'océan. Au-delà des observations, la nécessité de mieux comprendre comment l'océan et les autres milieux connexes interagissaient avec l'atmosphère s'imposa.

C'est ce qui conduisit l'*OMM* à susciter et coordonner des activités de recherche en créant en 1967 avec l'*ICSU* («*International Council of Scientific Unions*», organisation non gouvernementale scientifique), le «*Global Atmospheric Research Programme – GARP*» et peu après à prendre en compte la question climatique en créant le «*World Climate Programme* (Programme Mondial sur le Climat)» lors du huitième congrès de l'*OMM*, en mai 1979.

1 - 1 Les organisations intergouvernementales dans l'étude du climat



Au début des années 1980 fut créé le «**Programme Mondial de Recherche sur le Climat – PMRC**» ou «**World Climate Research Programme –WCRP**», déjà évoqué chapitre IV. Il prenait la suite du **GARP** et constituait en associant l'**ICSU** le volet recherche du **Programme Mondial sur le Climat**. Il ouvrait une nouvelle ère en institutionnalisant, au sein de la communauté des sciences de

l'environnement, la recherche sur le climat.

Le **WCRP** concrétisait la prise de conscience du changement climatique et de sa variabilité par la communauté des atmosphériciens en y associant les autres composantes du système climatique, océan, cryosphère, biosphère etc...

Le **WCRP** se donnait deux objectifs de recherche principaux :

- la prévision du climat, parallèle à la prévision météorologique,
- et le diagnostic de l'influence de l'homme sur le climat.

Il se dotait pour cela d'un arsenal de réflexion et de programmation scientifique avec à sa tête le «**Joint Scientific Committee –JSC**» rassemblant une dizaine de scientifiques parmi les plus représentatifs des différentes communautés scientifiques impliquées dans le climat :

- atmosphériciens,
- océanographes,
- glaciologues,
- paléoclimatologues... etc .

Le **JSC** au sein du **WCRP** facilitait ainsi une première agrégation de pièces du puzzle climatique parmi les domaines scientifiques les plus engagés dans l'étude du climat et sa variabilité.

Parallèlement et du fait du rôle prépondérant, de plus en plus évident, de l'océan dans le climat, les océanographes décidèrent également de mettre sur pied une instance scientifique réunissant toutes les disciplines océanographiques impliquées dans le climat :

- physique,
- chimie,
- biologie,
- paléocéanographie...etc.

Ce fut la création en 1979 du «**Committee on Climatic Change and the Ocean – CCCO**» composé d'une douzaine de scientifiques représentants ces disciplines sous la double tutelle de la **COI** et du «**Scientific Committee for Oceanographic research - SCOR**», cénacle scientifique émanant de l'**ICSU** pour les sciences de l'océan. Le **CCCO** était destiné à coordonner l'étude de l'océan sous tous ses aspects dans le cadre du **PMRC/WCRP**.

Son premier président fut **Roger Revelle**, déjà abondamment évoqué précédemment (Chapitre 4). Les présidents des groupes du **SCOR** impliqués dans la question climatique étaient des membres correspondants du **CCCO** qui créa des panels spécialisés sur les domaines les plus importants de la question climatique :

- «**Theoretical aspects**»,
- «**Arctic and Antarctic Activities**»,
- «**Ecology**»,
- «**Paleoclimatology**».

Le **CCCO** était clairement destiné à promouvoir et à coordonner toutes les composantes de l'océanographie dans l'étude du climat. Structurellement il se plaçait de ce fait au côté du **JSC** pour exprimer la «**pensée et les projets**» des communautés océanographiques impliquées dans l'étude du climat auprès du **PMRC/WCRP**.

Le **CCCO** fut l'initiateur des programmes océanographiques à grande échelle :

- **TOGA** «*Tropical Ocean and Global Atmosphere*»
- et **WOCE** «*World Ocean Circulation Experiment*»,

qui répondaient aux demandes du **WCRP** et du **JSC**. Ils seront présentés en détail plus loin.

Avec ces «**armes lourdes**» que représentaient les organisations internationales sous la caution de l'**ONU**, les chercheurs des sciences du climat avaient acquis une force de frappe sans équivalent pour convaincre leurs instances scientifiques nationales et leur gouvernement d'engager des moyens importants sur ces domaines de recherche.

Ainsi, à partir des années 1980, ces recherches sur l'environnement terrestre et le climat prirent du muscle dans les principaux pays développés. Nombre d'entre eux s'engagèrent dans des coopérations internationales sous la bannière de ces grands programmes scientifiques dédiés à des questions fondamentales et nécessitant des moyens importants hors de portée des ressources d'un seul pays.

L'internationalisation était en marche avec le lancement de ces vastes «**machineries scientifiques**» désignées par des sigles anglo-saxons parfois imprononçables pour les media et le public ! :

- **TOGA**,
- **WOCE**,
- **GEWEX**,
- **CLIVAR**,
- **JGOFS**,...

Mais ces rassemblements de moyens et de personnels sans précédent, dans la durée et la diversité des spécialités scientifiques, venant de pays quelquefois opposés politiquement, de l'est et de l'ouest confondus, ont permis de répondre à des questions fondamentales qui touchaient à notre environnement.

1 - 2 Émergence des premiers programmes internationaux sur le climat

La mise sur pied et l'organisation de tels programmes scientifiques internationaux est longue et délicate. Ces programmes ont généralement pour origine un groupe de chercheurs désireux d'unir leurs efforts autour d'une idée qu'ils partagent et de rechercher les moyens de convaincre leurs institutions scientifiques proches et au-delà leurs gouvernements, de leur octroyer les moyens nécessaires à leur réalisation.

C'est une démarche au départ qualifiée quelquefois de «**bottom up**» car elle émane des chercheurs eux-mêmes à la base et s'adresse vers le haut à leurs institutions dans le but de faire accepter ces projets, de les intégrer dans la programmation nationale et les financer.

Mais rapidement la dimension nationale s'avère souvent insuffisante ; pour être crédibles ces projets doivent obtenir une caution internationale et surtout ils doivent **associer d'autres pays pour accroître les moyens mis en œuvre et partager les coûts**. Pour cela les institutions internationales sont incontournables pour discuter, mettre en forme, proposer ces projets et les cautionner avant de les soumettre à leur tour aux responsables gouvernementaux des différents pays susceptibles de fournir des moyens pour atteindre les objectifs annoncés. À ce stade la démarche devient alors pour les scientifiques «**top down**», en ce sens que les appels d'offres de participation aux programmes sont proposés maintenant du haut des instances internationales et nationales.

Le **PMRC/WCRP** avec le **JSC** et le **CCCO** ont été les instances scientifiques internationales qui ont construit les premiers programmes internationaux dédiés à l'atmosphère, à l'océan et à leurs interactions dans la dynamique du climat.

Les deux programmes historiques impliquant l'océan et ses relations avec l'atmosphère sont :

- **TOGA** «*Tropical Ocean and Global Atmosphere*»
- et **WOCE** «*World Ocean Circulation Experiment*»,
- auxquels on peut ajouter **GEWEX** «*Global Energy Water EXperiment*» pour le cycle de l'eau et les échanges d'énergie entre les deux enveloppes fluides.

Ces programmes, au sein du **WCRP**, scellèrent les **relations entre la dynamique de l'atmosphère et celle de l'océan, ainsi qu'entre les communautés scientifiques des atmosphériciens et des océanographes**, au cours de la décennie des années 1980.

TOGA (1985-1995) fut dédié à l'étude de l'interaction entre la basse atmosphère et l'océan intertropical

superficiel où se manifestait, dans le Pacifique principalement, un phénomène assez étrange, déjà évoqué chapitre IV aux conséquences climatiques désastreuses, appelé «*El Niño*», qui avait attiré la curiosité des riverains depuis des siècles et qui maintenant intriguait les scientifiques. Ce phénomène se caractérisait par un réchauffement des eaux superficielles du Pacifique équatorial oriental, et par une inversion est-ouest d'un ensemble de paramètres météorologiques et océaniques : température superficielle de l'océan, pression atmosphérique et vent sur la totalité du bassin équatorial pacifique.

Le même phénomène est aussi observé dans l'océan Atlantique mais avec une amplitude moindre. Emblématique du couplage entre l'océan et l'atmosphère à l'échelle du Pacifique équatorial, cet événement pseudo-cyclique avec une fréquence variable de 3 à 5 ans a été mis en évidence lors de l'**Année Géophysique Internationale** (1957-1958) durant laquelle le phénomène *El Niño* se manifesta avec vigueur. **Jacob Bjerknes** fut le premier à mettre en évidence les mécanismes du couplage océan/atmosphère à l'origine du phénomène et l'océanographe, **Klaus Wyrtki** en fit une étude détaillée. Mais il était nécessaire de collecter des observations pendant une durée assez longue (10 ans) dans l'océan et l'atmosphère pour identifier et comprendre l'enchaînement des mécanismes d'interaction. Il était nécessaire aussi de développer des modèles de ces processus, l'objectif ultime étant de prévoir l'apparition et l'évolution du phénomène pour en atténuer les conséquences malheureuses sur les populations riveraines du Pacifique.

WOCE est né de la prise de conscience des océanographes de leur **méconnaissance presque totale de la dynamique et de la circulation générale des océans dans leur globalité**.

Certes les schémas généraux de cette circulation étaient connus, mais la très faible densité d'observations de qualité, notamment dans les profondeurs, renvoyait une image encore très floue de cette circulation moyenne et de sa variabilité dans des régions clés comme les détroits et les seuils. Certaines régions difficiles d'accès étaient encore totalement inconnues, d'autres, soumises à une variabilité multifréquences importante, étaient insuffisamment échantillonnées. Il devenait indispensable et urgent d'acquérir une connaissance minimale de cette circulation générale et de sa variabilité compte tenu du rôle de l'océan dans le climat. Son importance venait d'être mise en évidence et réévaluée par des travaux basés sur les données historiques montrant que **l'océan jouait un rôle essentiel dans le rééquilibrage énergétique de la Terre, et donc dans le climat, en transportant la chaleur, accumulée dans les tropiques, aux plus hautes latitudes**.

GEWEX arriva plus tardivement, en 1990, parmi les programmes lancés par le **PMRC**. Il fut inspiré principalement par **Pierre Morel** alors qu'il était le directeur de ce **PMRC**.

Les échanges d'eau et d'énergie entre l'atmosphère et l'océan apparaissaient en effet comme les mécanismes physiques essentiels sous-tendant les interactions entre les deux milieux fluides. Par ailleurs, dans les premières tentatives de simulations de ces interactions, le rôle de l'eau dans l'atmosphère et sa paramétrisation dans les modèles apparurent rapidement très complexes et très difficile à prendre en compte au regard du rôle très important de la vapeur d'eau dans l'effet de serre et des nuages dans le bilan radiatif de la Terre. **Ce rôle du cycle de l'eau dans le climat apparut bientôt comme une inconnue majeure qui nécessitait des investigations scientifiques poussées**. C'est ce qui motiva la mise sur pied de ce grand programme international.

2 - Une préfiguration de TOGA dans l'Atlantique : les programmes joints SEQUAL et FOCAL

Les premières idées sur les projets de programmes océanographiques à finalité climatique à développer vinrent des USA, comme souvent. Les réunions américaines destinées à préparer les grandes orientations de leur recherche océanographique, avec les répartitions budgétaires afférentes, pour la décennie 1980, furent marquées par une **vigoureuse confrontation entre les tenants de l'océan Pacifique et les tenants des océans Atlantique et Indien**.

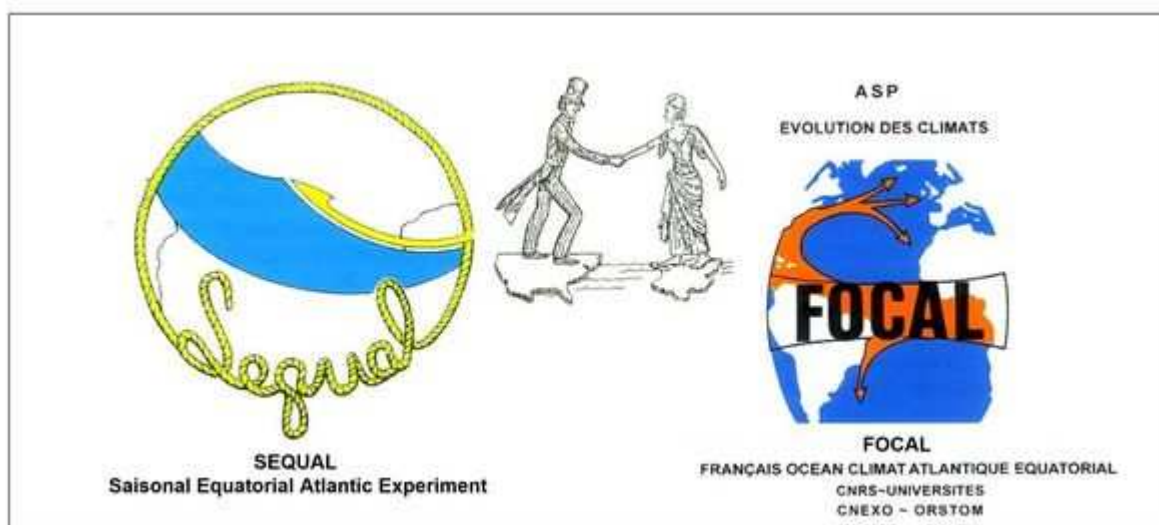
Le phénomène *El Niño*, que l'on commençait à bien connaître par les études détaillées que venait d'en faire **Klaus Wyrtki** (de l'Université d'Hawaï) en 1975 et d'autres dont **Rasmusson** et **Carpenter** (1982), avait **son origine dans le vaste Océan Pacifique**. Il paraissait donc évident pour une majorité d'océanographes appartenant aux institutions qui bordaient l'Océan Pacifique, notamment ceux de la **Scripps** en Californie et de l'**Université d'Hawaï**, qu'il fallait faire porter l'effort principal sur cet océan et sur le phénomène *El Niño*.

Les partisans de l'Atlantique, au contraire, arguaient que la grande étendue du Pacifique jouait en sa défaveur pour mener un programme d'observation susceptible d'élucider le détail des mécanismes physiques si particuliers en jeu à proximité de l'équateur. L'océan Atlantique, au contraire, trois fois moins étendu à l'équateur dans le sens zonal, proche des régions développées du nord et important pour leur climat, leur paraissait plus favorable pour une étude poussée des mécanismes physiques, étant entendu que ces mécanismes étaient supposés être les mêmes dans les deux océans qui ne différaient que par leur taille. En fait cette querelle était directement liée à la répartition des institutions de recherche océanographiques américaines entre la côte est - Atlantique - et la côte ouest - Pacifique -.

Le Pacifique a réussi effectivement à drainer, durant la décennie 1980, une fraction substantielle des moyens alloués par les agences de financement américaines : **NSF, NOAA, NASA** et **ONR** comme on va le voir.

Cependant l'Atlantique eut sa part sous la pression d'un groupe d'océanographes dynamiques venant de la côte est : **Woods Hole, MIT, Lamont, Columbia, GFDL, Harvard**, et de différentes autres universités ...

Ils se rassemblèrent sous une bannière commune, **SEQUAL «Seasonal Equatorial Atlantic Experiment»** pour faire une proposition de recherche intégrée sur l'Atlantique. Très tôt ces scientifiques «atlantistes» américains comprirent que s'ils pouvaient entraîner à leur côté un programme étranger, ils accroissaient considérablement leur chance d'obtenir le financement souhaité pour leur projet. Or il se trouvait que de l'autre côté de l'Atlantique un programme français sur l'Atlantique tropical, **FOCAL «programme Français Océan Climat dans l'Atlantique équatorial»**, initié principalement par l'**ORSTOM**, se préparait et était également dans une phase de soumission à l'instance nationale française de programmation de la recherche sur le climat, le «**Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat – PNEDC**», nouvellement créée et animée par **Pierre Morel**.



Les logos des deux programmes

Ces deux programmes, français et américain, étaient donc susceptibles de se soutenir mutuellement vis-à-vis de leurs agences de financement respectives dans les deux pays. Une série de rencontres entre les scientifiques américains de **SEQUAL** et les français de **FOCAL** se déroulèrent alternativement aux USA et en France pour coordonner leurs objectifs, définir les opérations plus ou moins communes qu'ils envisageaient de mener ensemble en mer, ainsi que les investigations théoriques et la modélisation numérique qui faisaient leurs débuts.

Les deux programmes, américains et français, furent acceptés et financés dès 1982 par leurs agences de financement respectives au niveau des demandes budgétaires présentées et pour une durée de trois années.

Ces financements soutenaient :

- des opérations de terrain qui furent menées de 1982 à 1984,
- des investigations théoriques,
- des modèles
- et des analyses des observations anciennes numérisées dans des banques de données.

L'objectif commun était d'observer et de comprendre la réponse saisonnière globale des couches supérieures d'un bassin équatorial, en l'occurrence l'océan atlantique, soumis à l'action mécanique du vent. Cet objectif était dans la ligne des interrogations que soulevaient les premières simulations numériques de la dynamique océanique équatoriale montrant des phénomènes dits de «**remote forcing**», ou «**actions à distance**» en français, le long de l'équateur dans les océans Pacifique et Atlantique. Ces actions à distance pouvaient être générées par des ondes piégées à l'équateur et se propageant généralement d'ouest en est. Certains pensaient que l'on avait là la clé définitive du phénomène **El Niño** et de phénomènes semblables observés plus rarement dans l'Atlantique. D'autres pensaient, au contraire, que les choses étaient plus compliquées et que l'on devait étudier en détail, le long de l'équateur, la réponse de l'océan à un **forçage** du vent variable saisonnièrement mais aussi susceptible de changements brutaux comme dans le Pacifique. L'étroitesse de l'Atlantique par rapport au Pacifique se prêtait mieux à cette étude basée principalement sur l'observation.

Le principal résultat fut la mise en évidence de la dépendance étroite de la réponse de l'océan, caractérisée par la profondeur de la **thermocline**, aux fréquences principales de variations du vent. L'inclinaison zonale - entre l'est et l'ouest - de la thermocline conditionne les transferts d'eaux chaudes ouest-est et inversement. Lorsque le vent varie régulièrement en fonction de la saison, sans sautes brutales, la thermocline s'ajuste également progressivement en phase avec le vent et il n'y a pas génération d'ondes équatoriales susceptibles d'engendrer des phénomènes de «**remote forcing**».

Au contraire, des sautes de vent, comme cela se produit souvent dans le Pacifique mais rarement dans l'atlantique, génèrent des ondes - principalement des **ondes dites de Kelvin** - qui se propagent d'ouest en est et contribuent à déclencher des phénomènes amenant des eaux chaudes à l'est caractéristiques du phénomène **El Niño**.

Curieusement et de façon heureuse pour les deux programmes ce phénomène se manifesta exceptionnellement dans l'Atlantique en 1983. On était cette année là en présence d'un processus ondulatoire générant un «**remote forcing**» caractérisé qui fut analysé en détail grâce aux observations des deux programmes. Des travaux théoriques et des simulations numériques confirmèrent les observations et éteignirent la controverse entre ceux qui privilégiaient, et opposaient, l'importance des actions à distance (**Remote forcing**) aux actions locales et globales du vent. Ces résultats, qui furent publiés dans le journal scientifique «Nature», représentaient une grande avancée dans la connaissance de la dynamique des océans équatoriaux en relation avec l'atmosphère et les phénomènes inclus dans la variabilité naturelle du climat, comme **El Niño – La Niña**, affectant ces régions.

3 - TOGA reprend ses droits dans le Pacifique

Bien que centré sur les tropiques et le Pacifique, le phénomène **ENSO**, association de «**El Niño**» et de «**Southern Oscillation**» a un **retentissement climatique global qui touche une grande partie de la ceinture tropicale et même au-delà, la planète entière**. La perspective de comprendre la cause de ces cycles apériodiques, de façon à les prévoir au moins partiellement, a convaincu les scientifiques et les décideurs des années 1980, d'étudier en profondeur ce phénomène, en prélude à une compréhension plus large de la variabilité du climat. Mais une entreprise aussi ambitieuse nécessitait un effort coordonné sans précédent des océanographes et des atmosphériciens. Il était nécessaire de collecter des observations sur les deux milieux et dans les trois océans, et de construire des modèles suffisamment réalistes pour utiliser leurs simulations en mode prédictif. Un tel effort nécessitait un rassemblement de moyens et de personnels scientifiques qui ne pouvait être obtenu que dans le cadre d'un grand programme international et sur une longue durée. Ce rassemblement orchestré par le **PMRC** et le **CCCO**, donna le jour au programme **TOGA**.



ADRIAN EDMUND GILL, 1937–1986

TOGA réussit donc à rassembler, pendant plus de 10 ans, de 1985 à 1995, une fraction majoritaire de la communauté tropicaliste des météorologues et des océanographes, avec l'objectif **d'observer de façon détaillée** et si possible de prévoir l'évolution de l'oscillation météo-océanique **ENSO** ainsi que ses effets sur la variabilité climatique interannuelle des régions tropicales. Dès 1982, le **CCCO** créa un groupe de travail préparatoire, dont l'animation fut confiée à l'un de ses membres, l'océanographe britannique **Adrian Gill**, avec la mission de formuler les fondements scientifiques d'un programme international sur le sujet. Ce groupe de travail fut ensuite formellement reconnu par le **JSC**, sous les auspices du **PMRC**, de l'**OMM** et de l'**ICSU**. Le **PMRC**, sur la base des propositions du groupe de travail préparatoire d'**Adrian Gill**, institua un «**Scientific Steering Group - SSG**» pour élaborer et coordonner les objectifs scientifiques du programme. Adrian Gill fut naturellement le premier président du **SSG**. Malheureusement il décéda brutalement en 1986 ; Il fut remplacé par **Peter Webster**, un météorologue australien. Pour coordonner l'action des pays engagés au sein du **SSG** et de ses sous-groupes de travail, **TOGA** se dota d'un «**International TOGA Board**», présidé par le météorologue brésilien **Antonio Divino Moura** et rassemblant les représentants nationaux des pays participants. Ce «**Board**» international fut chargé d'évaluer les résultats et le suivi du programme ainsi que garantir la réalité des engagements de moyens proposés par ces pays. Enfin, pour coordonner la mise en œuvre pratique des

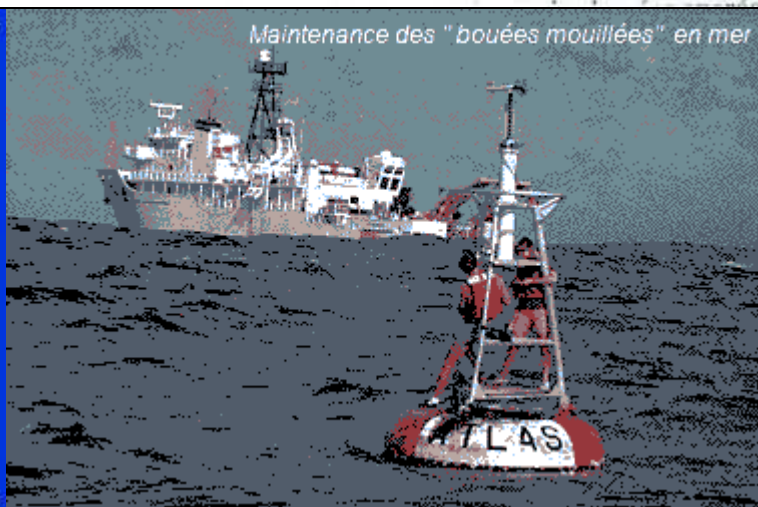
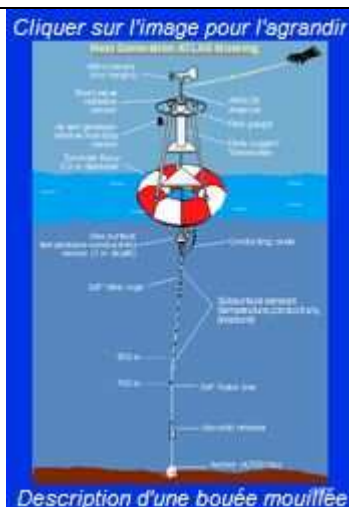
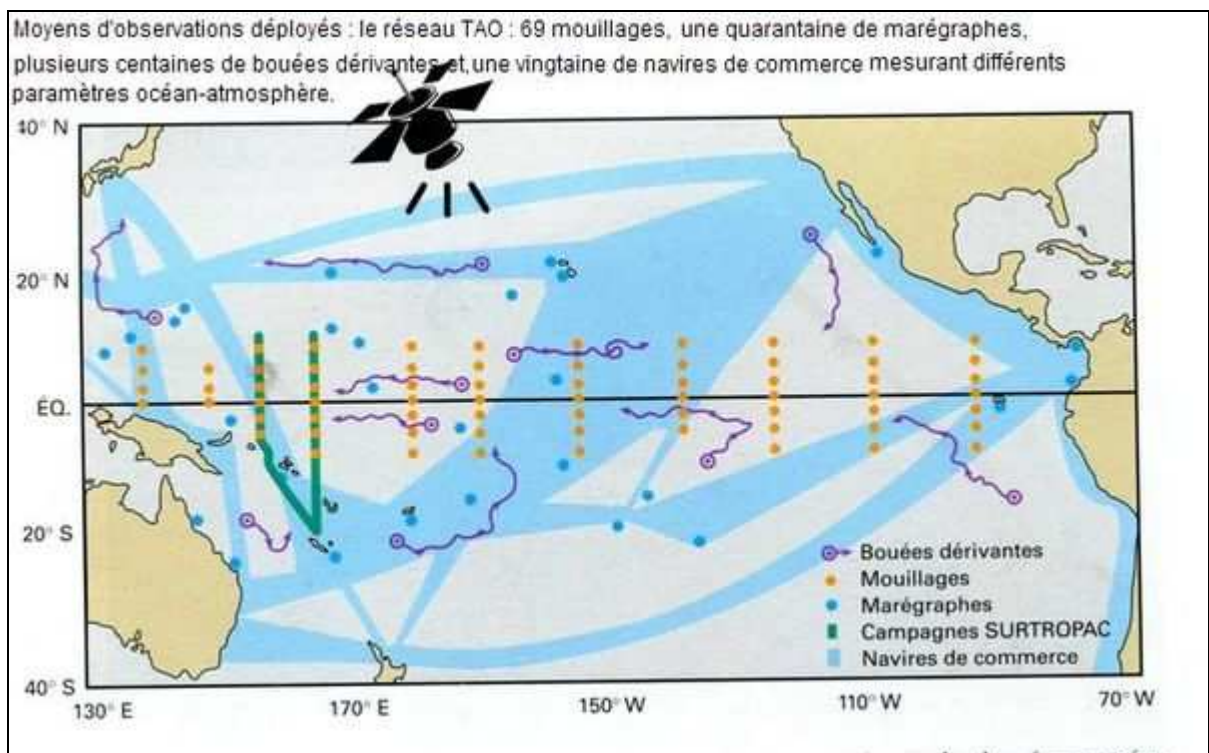
opérations sur le terrain par les différentes institutions scientifiques des pays participants, un «**International Project Office**» fut installé en Angleterre sous la direction d'un britannique, **John Marsh**.

Les objectifs généraux de **TOGA** se déclinaient en trois volets :

- i. Apporter une description des océans tropicaux et de l'atmosphère globale, considérés comme formant un système couplé variable dans le temps, de façon à déterminer dans quelle mesure ce système est prévisible à des échelles de temps de quelques mois à quelques années, et comprendre les mécanismes qui sous-tendent cette prévisibilité.
- ii. Étudier la possibilité de modéliser le système couplé océan-atmosphère dans le but de prévoir ses variations de quelques mois à quelques années.
- iii. Fournir les bases scientifiques nécessaires à l'établissement d'un système d'observations et de transmission de ces observations pour réaliser une prévision opérationnelle.

Pour atteindre ces objectifs, le "**SSG TOGA**" proposa plusieurs types d'opérations :

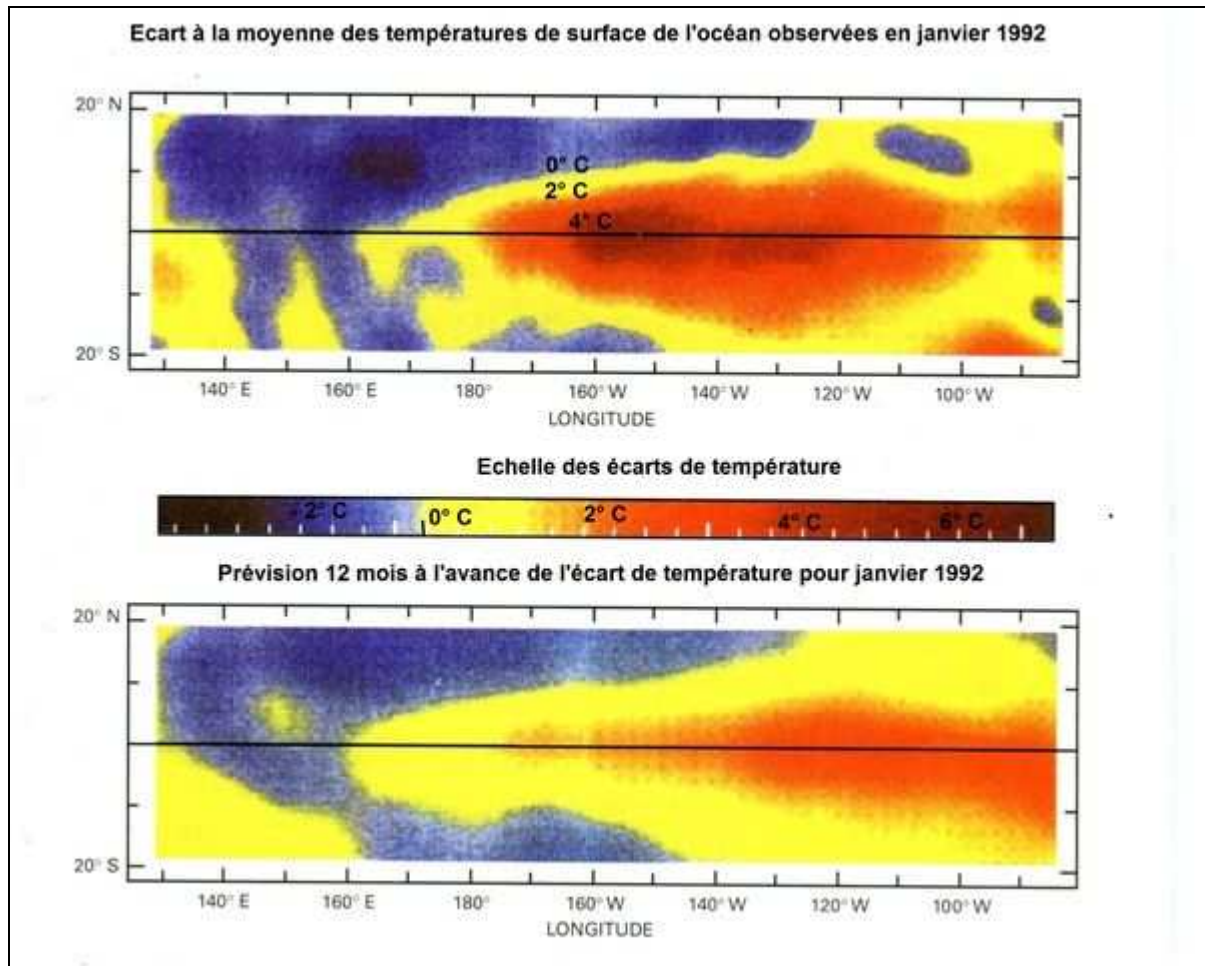
- Mettre en place un système d'observation de l'océan et de la basse atmosphère.



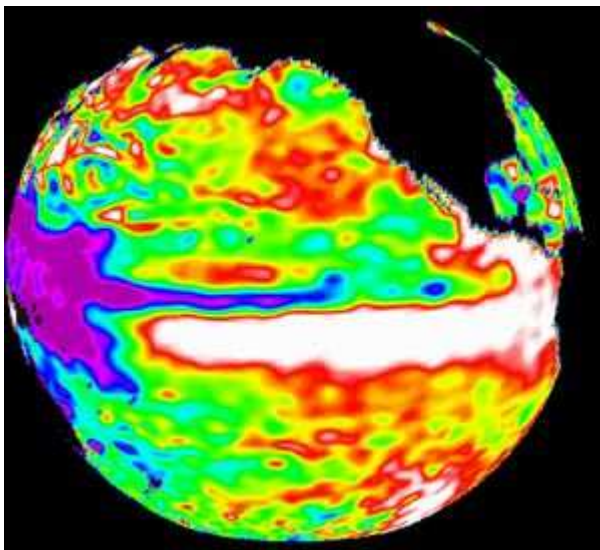
- Réaliser une étude de processus qui fut concrétisée par un programme annexe : «**coupled ocean atmosphere response experiment -COARE**» nécessaire à la compréhension détaillée des mécanismes d'échange énergétique entre les deux milieux dans la région chaude – warm pool- de l'ouest Pacifique où l'interaction entre la basse atmosphère et l'océan superficiel est à son paroxysme.

- Développer des modèles d'océans et des modèles couplés océans-atmosphère dans la perspective de prévoir l'évolution du système couplé.
- Conduire des études diagnostiques du phénomène **ENSO** et rattacher **ENSO** aux phénomènes semblables affectant les autres régions tropicales, Océan Indien pour la mousson et Océan Atlantique où un phénomène semblable à **El Niño** se développe avec une intensité réduite.

Exemple de résultats du programme TOGA :



Ci-dessus, la première prévision d'El Nino par Cane et Sarachik en 1991 à l'aide d'un modèle simple couplé océan-atmosphère le long de l'équateur utilisant les observations des mouillages présentés sur la figure précédente



Cette prévision fut également confirmée par la première observation de l'anomalie de la topographie de la surface par le satellite altimétrique TOPEX-POSEÏDON qui confirma l'El Niño de 1992.

L'image ci-contre montre la carte réalisée à partir des données altimétriques fournies par TOPEX-POSEÏDON.

Elle met en évidence les différences de hauteur de l'Océan Pacifique pendant le phénomène El Niño. Les zones en blanc reflètent un rehaussement par rapport au niveau moyen de l'océan de une à deux dizaines de cm tandis que les parties en violet traduisent des dépressions de l'ordre de 20 cm.

TOGA représente le premier grand programme international pour lequel océanographes et atmosphériciens ont interagi en équipe, sans distinction d'origine et de culture scientifique.

C'est aussi le programme le plus étendu dans le temps, et le premier aussi qui préfigure l'océanographie opérationnelle de demain semblable à la météorologie opérationnelle pour la prévision quotidienne du temps et indispensable pour la future prévision opérationnelle du climat. C'est cette perspective de prévision opérationnelle du climat qui conduisit **TOGA** à donner autant d'importance au développement de la modélisation. Mais, pour avoir des modèles réalistes, avec une bonne capacité de prévision, il faut disposer d'observations nombreuses et de qualité, à la fois dans chacun des deux milieux et à leur interface. C'est pourquoi un effort coûteux et sans précédent a été également consacré aux systèmes d'observations mis en place. Ces systèmes d'observation, encore expérimentaux durant **TOGA**, ont pris un caractère opérationnel dès la fin du programme en 1995.

4 - La circulation générale de l'océan - Le Programme WOCE

À la fin des années 1980 on ne disposait toujours pas d'une image satisfaisante de la circulation générale des océans et de sa variabilité pourtant indispensable pour comprendre sa relation avec le climat.

De nombreuses régions n'avaient jamais été explorées, d'autres, supposées être très variables dans le temps, n'étaient pas couvertes par des campagnes d'observations répétées. Il était indispensable de pouvoir disposer de nouvelles observations plus complètes, plus homogènes, qui couvriraient la totalité de l'océan et dont la qualité serait indiscutable.

La mise sur pied d'une telle opération internationale mettant en commun des moyens d'observation en grand nombre paraissait être la seule issue possible. **C'est ainsi que naquit l'idée du plus grand programme international d'observation in situ de l'océan mondial jamais envisagée.** Ce projet fut renforcé par les perspectives prometteuses offertes par **l'observation spatiale**. Il devenait envisageable, en utilisant une nouvelle génération d'instruments embarqués sur des plateformes satellitaires, les altimètres (*voir chapitre V*), d'obtenir une information sur la dynamique de l'océan parallèlement aux observations in situ. **Les deux approches, mesures in situ et mesures spatiales, s'épaulaient mutuellement.**



Carl Wunsch

L'initiateur de **WOCE** est incontestablement **Carl Wunsch** du **MIT**, qui, à l'étonnement de certains de ses collègues océanographes, proposa, à la fin des années 1970, de mobiliser l'essentiel des moyens de l'océanographie mondiale, en particulier ses navires océanographiques, pour couvrir l'océan de «**stations de mesures hydrologiques**» de la surface au fond comme on le faisait depuis l'époque du Challenger. Ces observations à partir de stations hydrologiques classiques rappelaient l'océanographie des grandes campagnes historiques du début du siècle. Mais **Carl Wunsch** avait un autre atout, plus convainquant et plus moderne, dans sa manche. C'était la perspective d'obtenir bientôt des observations de la topographie dynamique de la surface des océans depuis l'espace à l'aide de radars altimètres embarqués sur des satellites. On a vu (*chapitre V*) que dans le cadre d'un projet franco-américain **TOPEX/POSEIDON** sur le point d'être acceptés par les deux pays il était envisageable d'obtenir cette topographie.

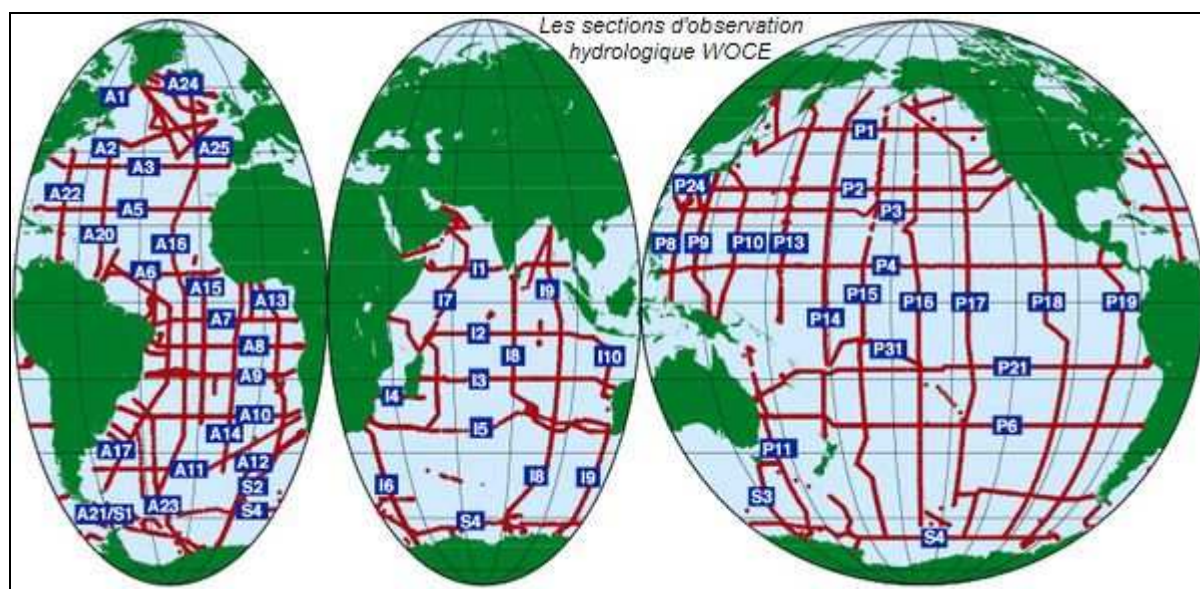
Carl Wunsch prétendait que **le couplage de cette topographie de la surface vue de l'espace avec la connaissance du champ de densité de l'océan, obtenue dans ses trois dimensions par des campagnes hydrologiques, allaient permettre d'accéder aux champs de vitesse des courants à toutes profondeurs et donc à la circulation générale de l'océan mondial.**

Par ailleurs la connaissance du **champ de vent**, également issue en grande partie des observations satellitaires, allait permettre de «**forcer**» des modèles d'océan dans lesquels on pourrait «**assimiler**» les observations précitées de façon à obtenir les images les plus réalistes qui soient de l'état de l'océan dans toute sa masse, ainsi que suivre et prévoir son évolution. De tels outils tendant à offrir enfin une «**vision**» de l'océan et de sa dynamique, approchant celle de l'atmosphère, s'inscrivaient en droite ligne dans l'objectif climatique ; **la connaissance de l'océan rattrapait son retard sur celle de l'atmosphère.**

Il était néanmoins indispensable de démontrer au préalable la complémentarité des mesures spatiales avec les mesures in situ de **WOCE**. Cette démonstration ne fut pas immédiatement convaincante. Bien que les promoteurs des projets spatiaux se soient déclarés capables de fournir une topographie dynamique assez précise de la surface des océans - de l'ordre de quelques centimètres - beaucoup d'océanographes restaient méfiants et incroyables. L'argument de fond que défendait **Carl Wunsch** pour justifier cette vaste opération d'observations in situ était fondée sur le fait que la connaissance des courants superficiels que promettaient les satellites était une occasion unique, à ne pas manquer et à saisir, d'accéder enfin aux champs de courants à toutes profondeurs. Mais pour cela, il fallait connaître le champ de densité de l'intérieur de l'océan, ce qui ne pouvait être réalisé que par des mesures in situ, qui légitimaient **WOCE**. Mais tous ces arguments en faveur du projet, avancés avec force par **Carl Wunsch** et ceux qui le soutenaient, notamment **Francis Bretherton**, restaient encore au stade de propositions «*bottom up*» émanant de la communauté scientifique de base qui, si brillante soit-elle, demeurait encore impuissante tant qu'elle n'avait pas convaincu les instances internationales de programmation, **WCRP**, **JSC**, **CCCO** et ultérieurement convaincu aussi les agences nationales de financement.



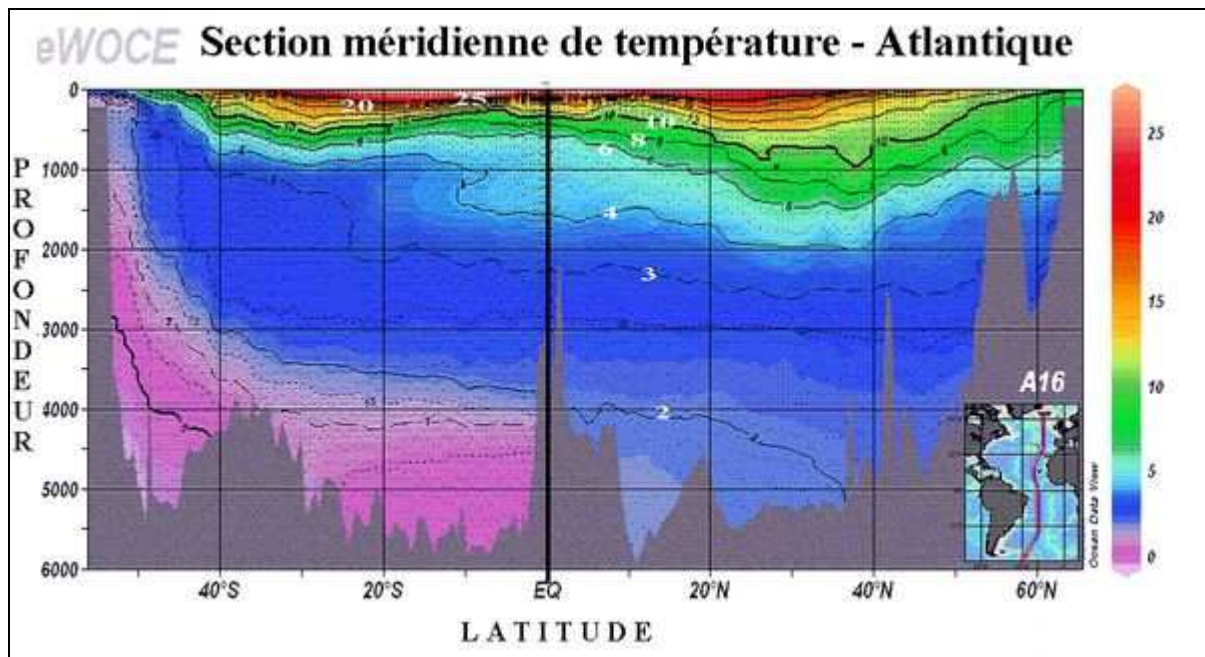
Très rapidement, le **CCCO** comprit que le projet **WOCE** était une riche idée qu'il fallait défendre avec énergie. L'acte de naissance de **WOCE**, en tant que projet international, date de la conférence jointe **CCCO/JSC** organisée par **Bryan Robinson**, professeur à l'université de Harvard, sur les programmes océanographiques à grande échelle, qui se tint à Tokyo en mai 1982. Cette conférence fut un événement et marque un tournant concernant l'engagement des océanographes dans l'étude du climat. Presque toute l'océanographie mondiale était présente. À cette époque, le projet **TOGA** étant déjà sur les rails, c'est donc **WOCE** qui retint l'essentiel de l'attention pour mettre sur pied la plus grande opération commune jamais planifiée par des océanographes. À partir de cette conférence, le **CCCO** prit en charge la construction du projet et créa conjointement avec le **JSC** un «*Scientific Steering Group – SSG*». **WOCE** était donc un projet à dominante océanographique, mais qui restait assujéti aux avis et à l'encadrement des climatologues et des atmosphériciens par l'intermédiaire du **JSC** sous l'égide de l'**OMM**.



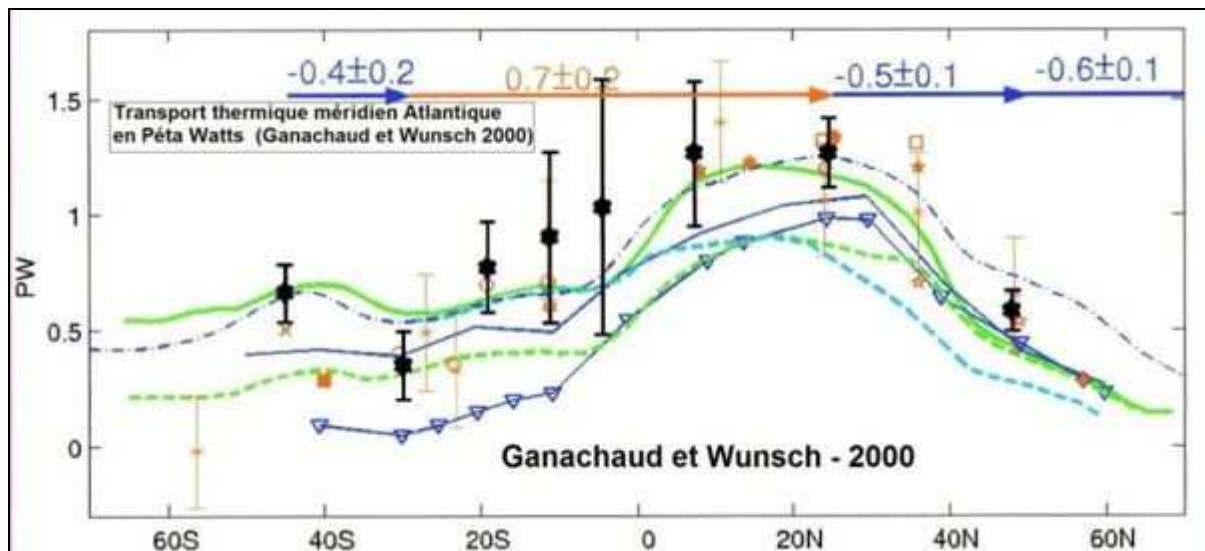
Les expressions : radiales, ou sections, hydrologiques désignent un ensemble de stations d'observations de l'océan, dites stations hydrologiques, réalisées le long de la route d'un navire.

Dès 1983, le **SSG** précisa les objectifs du programme et créa plusieurs groupes de travail pour avancer dans la définition du projet. La tâche était ardue, car une trentaine de pays étaient impliqués sur les quatre océans avec des objectifs étendus à presque tous les champs de l'océanographie. Il fallut également établir un «*WOCE International Project Office - WOCE/IPO*» à Wormley en Angleterre, et lorsque l'on approcha des échéances opérationnelles, un centre de gestion des opérations à la mer fut mis en place en Allemagne.

Un plan scientifique fut établi en 1986 et un plan opérationnel en 1988. Une grande conférence scientifique se tint à Paris en novembre 1988, rassemblant à la fois les chercheurs et les décideurs des pays candidats à la participation au programme. Les opérations en mer se déroulèrent de 1990 à 1997.



Un résultat scientifique marquant émergea rapidement après les premières radiales d'observations dans l'Atlantique. Ce furent les estimations du transport méridien de chaleur réalisées par Ganachaud et Wunsch (en 2000). Ils confirmèrent que ce transport est toujours dirigé vers le nord et passe par un maximum voisin de 1 Péta Watts vers 20° N avec cependant une large plage d'erreur



En noir les observations WOCE montrant une large plage de variabilité (barres verticales).
En couleur des estimations antérieures par différents auteurs à partir de données historiques.

4 - L'eau et l'énergie irriguent le système climatique - Le Programme GEWEX

L'eau, ce corps chimique si rare dans l'univers assure l'habitabilité de notre planète en couplant ses systèmes biogéochimiques au système climatique. **Le cycle de l'eau, est au cœur du système climatique** et traverse tous les milieux qui le composent, atmosphère, océan, terre, glace, milieu vivant, et de ce fait est le principal agent des échanges énergétiques entre ces milieux qui déterminent le climat. C'est une évidence qui prit rapidement corps au sein du **PMRC** après le lancement de **TOGA** et de **WOCE** et lorsqu'apparurent les premières difficultés de la prise en compte dans les modèles numériques d'atmosphère, de sa teneur en vapeur d'eau, ainsi que la formation des nuages et leur conséquence sur la nébulosité et le bilan radiatif de la Terre.

La quantité d'eau contenue dans l'atmosphère, sous toutes ses formes, est en effet un paramètre critique qui contrôle la réponse climatique à toutes les perturbations extérieures affectant notre environnement. Les changements d'état de l'eau, évaporation, condensation, sublimation, s'accompagnent d'échanges

énergétiques considérables, notamment sous la forme de **«chaleur latente d'évaporation»** qui passe de l'océan à l'atmosphère ; et à l'intérieur même de l'atmosphère, lorsque la condensation se produit, elle libère cette énergie qui alimente de véritables **«moteurs thermiques atmosphériques»** responsables de sa dynamique.

La nécessité d'observer et de comprendre ces échanges énergétiques liés à la circulation de l'eau à travers les milieux constitutifs du système climatique s'imposa rapidement au **PMRC** et comprendre le rôle de l'eau dans le système climatique devint une priorité.

À l'état de vapeur, l'eau est, en effet, par son abondance, le plus puissant gaz à effet de serre qui soit. Les nuages sont également impliqués dans un très important processus de rétroaction, sur le climat par leur capacité à réfléchir le flux radiatif solaire incident. Un programme spécifique pour étudier le rôle de l'eau dans le climat fut donc mis sur pied, en 1990, au sein du **PMRC** sous l'impulsion principale de son directeur du moment, le français Pierre MOREL. Ce fut le **«Global Energy Water Experiment – GEWEX»**. L'objectif central du programme **GEWEX**, toujours en cours (en 2012) est de simuler et de prévoir, avec des modèles, les variations du régime hydrologique global de la planète avec ses impacts sur la dynamique des enveloppes fluides terrestres et leurs interfaces. **GEWEX** doit pouvoir aussi simuler l'évolution des régimes hydrologiques régionaux et leurs réponses aux perturbations environnementales associées notamment à celle de l'accroissement des gaz à effet de serre. **GEWEX** devra permettre d'atteindre un niveau de performance suffisant dans la modélisation pour pouvoir représenter correctement les précipitations et l'évaporation à l'échelle globale, ainsi que les bilans précis de ces échanges et leurs impacts sur l'évolution du climat. **GEWEX** est ainsi au cœur du dispositif du **PMRC** pour étudier la dynamique et la thermodynamique de l'atmosphère ainsi que ses interactions avec la surface terrestre continentale et marine. De ce fait c'est un programme connecté à l'ensemble des autres programmes du **PMRC**, notamment à CLIVAR qui prolonge **TOGA** et **WOCE** depuis 1995 et dont on reparlera plus loin. **GEWEX**, sous l'égide d'un comité scientifique et avec l'appui d'un **«International GEWEX Project Office - IGPO»**, s'est organisée en panels thématiques et en expériences régionales au cours des deux phases de son développement.

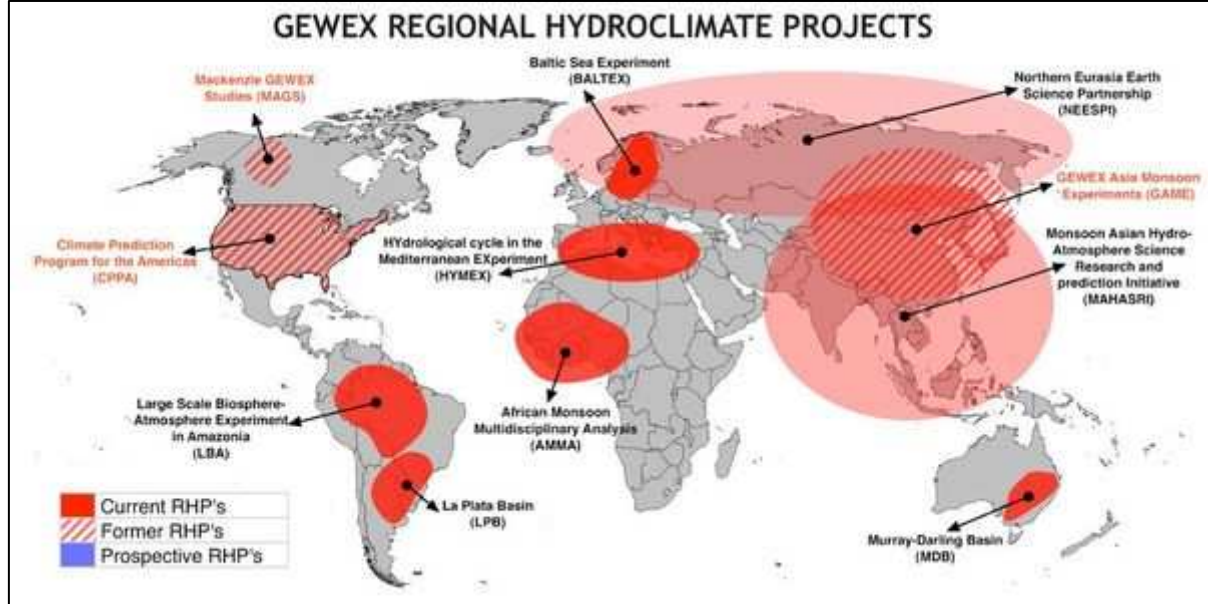
La première phase, de 1990 à 2002, s'est concentrée en premier sur le développement des outils nécessaires à cette recherche, particulièrement les modèles, et ensuite sur les projets possibles d'observations à partir des plateformes spatiales ainsi que les analyses régionales par bassins versants. Un accent particulier a été porté sur les nécessaires paramétrisations à introduire dans les modèles pour prendre en compte les processus complexes de rétroactions entre les nuages et les surfaces continentales ou océaniques.

Au cours de **la deuxième phase, à partir de 2002**, le programme s'est structuré autour de trois thèmes scientifiques pilotés chacun par un panel scientifique :

- l'hydrométéorologie avec un **«GEWEX Hydrometeorological Panel - GHP»**,
- la modélisation avec un **«GEWEX Modelling and Prediction Panel - GMPP»**,
- et enfin la question du bilan radiatif dans un **«GEWEX Radiation Panel – GRP»**.

Des expériences régionales sont mises sur pied dans différents sites caractéristiques de processus particuliers :

- Les mousson asiatiques et Atlantiques,
- une mer semi-fermée (la mer Baltique),
- la forêt amazonienne,
- le nord Canada en contact avec la calotte glaciaire,...



Ces opérations, sont pour la plupart toujours en cours. Nous nous bornons ici à souligner le rôle d'intégration joué par ce programme dédié à l'étude du fluide de transfert essentiel qu'est l'eau avec les échanges d'énergie qui l'accompagnent, aussi vital pour le fonctionnement de la machine climatique que l'est le sang pour un corps humain.

Le programme **GEWEX** contribue à resserrer encore plus étroitement les liens entre atmosphériciens et océanographes, en ajoutant de nouvelles pièces au puzzle climatique telles que l'hydrologie continentale et l'agrométéorologie dont on verra l'importance dans le chapitre suivant dédié au rôle de la biosphère dans le climat.
