



ACTUALITÉS MÉTÉO...

De -4000 av J.C. à 2020, une brève histoire de la prévision saisonnière



Photo 1 : arbre des 4 saisons

La prévision météorologique à long terme est une activité pour laquelle la demande sociétale dépasse largement les capacités de la science jusqu'à aujourd'hui et sans doute encore pour longtemps. Néanmoins, au cours des siècles, et surtout depuis la naissance de la météorologie scientifique au XIX^e siècle, de nombreuses tentatives ont été menées avec plus ou moins de bonheur.

Quelques unes sont rapportées ici.

Tant que nos ancêtres chasseurs-collecteurs se déplaçaient pour suivre les troupeaux de gibier et migraient soit vers le Nord soit vers le Sud en fonction de l'alimentation végétale disponible, ils n'avaient besoin que de prévisionnistes à courte et moyenne échéance pour régler leurs activités. Avec leur sédentarisation au cours de la seconde moitié de l'holocène, et l'invention de l'agriculture, un nouveau problème s'est posé : si je sème aujourd'hui, que vais-je récolter dans trois à six mois ?

Deux solutions ont été trouvées par nos ingénieux sapiens. La première est de demander l'aide de la bonne divinité. Par exemple Cérès, déesse des moissons, dont l'équivalent grec est Déméter. [photo 2]. Elle a donné son nom à un projet européen de 2001 à 2003, nous y reviendrons plus loin. La seconde consiste à construire des règles simples basées sur l'observation. Ces règles, nommées proverbes, avaient le bon goût de bien fonctionner à échelle de 6-12h. Par exemple « arc en ciel du matin apporte de l'eau à ton moulin ». En tout cas,

si une règle était sans fondement, elle était naturellement éliminée au bout de quelques années. À l'échelle de la saison, c'était une autre histoire. Tout d'abord, le long délai entre l'émission de la prévision et sa réalisation, faisait qu'on oubliait parfois ce qui avait été prévu. Ensuite, la grande variabilité des régimes de temps au cours d'une saison à nos latitudes fait qu'il était difficile de déterminer si un hiver ayant connu deux vagues de froid rigoureuses d'une semaine chacune et deux mois particulièrement doux, avait été un hiver chaud ou un hiver froid. Enfin la durée d'une vie humaine était trop courte, pour qu'un individu puisse accumuler et analyser



Photo 2 : Cérès par Antoine Watteau

américaines, canadiennes et japonaises. La Commission Européenne finance d'autres projets de recherche comme ENSEMBLES ou SPECS au cours des deux premières décennies du siècle. En 2018, elle finance également la production opérationnelle, à condition de remplir un cahier des charges strict, et de diffuser gratuitement tous les produits. Le programme Copernicus finance ainsi les cinq anciens partenaires de DEMETER. Les trois partenaires non-européens d'EUROSIP fournissent également la base de données, mais sans financement.

Sur le plan scientifique, les vingt dernières années voient une augmentation de la complexité des modèles, permise en partie par la disponibilité de calculateurs plus puissants, et en partie par la fraction croissante que prend la production de prévisions saisonnières auprès des services météorologiques nationaux. En vingt ans, apparaissent des modèles de banquise et de sol-végétation bien plus réalistes. La représentation de la physique atmosphérique est beaucoup plus détaillée. La résolution horizontale des océans passe de 250 km à 25 km, et celle de l'atmosphère de 200 km à 50 km. La troposphère et la stratosphère sont découpées en 139 tranches verticales contre 31 dans DEMETER. On constate bien entendu de meilleurs scores, mais la progression est beaucoup plus lente qu'on ne le voudrait, compte tenu des efforts consentis. Si la prévision de la température de surface du Pacifique équatorial est désormais très fiable jusqu'à 6 mois, il n'en va pas de même pour les prévisions sur l'Europe. L'auteur ne peut se retenir d'évoquer les déboires de nos amis du MetOffice qui, il y a quelques années, ont largement médiatisé une annonce « d'un été propice aux barbecues » suivie de « l'hiver le plus doux depuis un siècle », et sont revenus à plus de prudence médiatique par la suite.

MICHEL DÉQUÉ

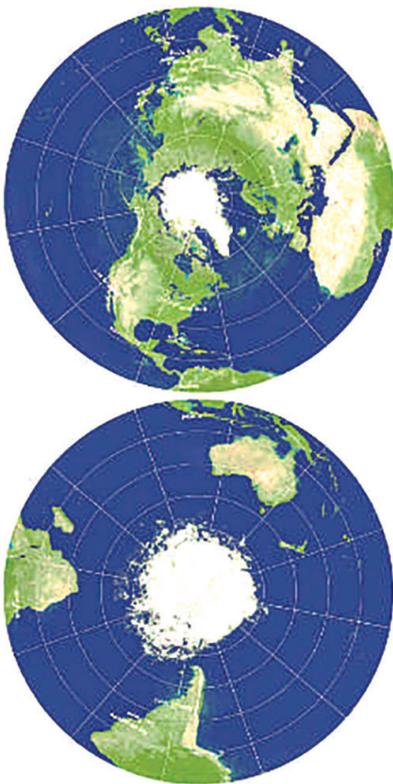
Un planisphère qui respecte la position et les proportions des continents

Comment représenter à plat (2D) une Terre sphérique (3D) ? Depuis tant d'années les cartographes se heurtent à ce défi : projection Mercator, projection Winkel Tripel, ...

Une équipe de l'Université de Princeton (États-Unis) propose une solution "recto-verso" : sur une face l'hémisphère nord, sur l'autre face l'hémisphère sud, l'équateur étant représenté par le bord des cercles.

Les continents sont alors coupés en deux mais ils conservent leur forme !

D'après *Sciences et Avenir*
avril 2021



Le Gulf Stream perd de la puissance

Des signes d'instabilité (température de surface, salinité, etc.) ont été détectés dans le courant marin nommé *Amoc* en anglais, (circulation méridienne de retournement de l'Atlantique Nord) dont fait partie le Gulf Stream.

L'Amoc fait remonter des eaux chaudes de l'équateur vers le Nord (en surface, ses eaux peuvent être 5°C à 15°C plus chaudes que celles qui l'entourent). Au niveau de la Floride, il se fond avec le Gulf Stream qui continue vers les côtes européennes où, grâce à lui, les hivers restent doux. Remontant ensuite vers le Groenland, il voit ses eaux refroidir et donc, plus denses, descendre en profondeur. Mais, la fonte des glaces, causée par le réchauffement climatique, apporte de l'eau douce qui l'empêche de plonger, ralentissant ainsi le "moteur". Son intensité est aujourd'hui à

sa valeur la plus basse depuis 1 600 ans. D'après le GIEC, s'il ralentit, le niveau des océans et la vitesse de réchauffement du continent seront impactés.

L'Amoc pourrait avoir atteint un point proche de la transition critique, le point de basculement entre le "mode fort" actuel et le "mode faible" redouté par les climatologues. S'agit-il d'une fluctuation ou est-ce le signe d'un basculement ? La différence est cruciale car le second serait irréversible. Toutefois, selon les experts du GIEC : "S'il est attendu que l'Amoc faiblisse avec le changement climatique, le Gulf Stream ne changera pas beaucoup et ne devrait pas s'arrêter complètement, même si l'Amoc s'arrête".

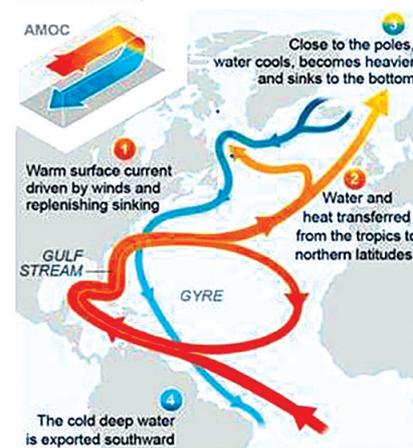
D'après *Actu Environnement.com*
août 2021

Will the Gulf Stream shut down?

The Gulf Stream, a warm current, is expected to weaken but not cease. This slowdown will affect regional weather and sea level.

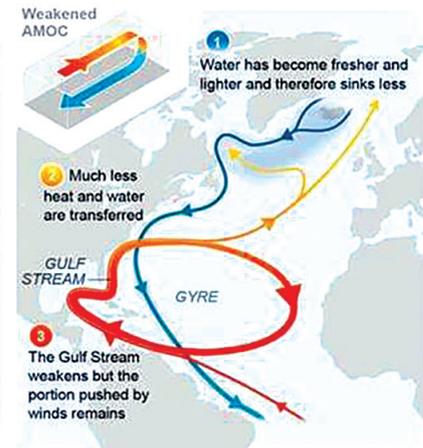
Today

The Gulf Stream is part of both the horizontal, subtropical gyre and the vertical, Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)



In a warmer world

Climate change weakens the AMOC, which slows the Gulf Stream down



Les trajectoires des avalanches deviennent imprévisibles

Selon le GIEC, "La température et l'humidité de l'air plus élevées font tomber une neige plus lourde, contenant beaucoup d'eau à une température plus élevée", ce qui diffère des nuages de flocons connus qui annoncent une poudreuse pouvant décrocher.

En effet, la quantité d'eau liquide présente dans la neige influe sur le frottement au sol et donc sur la distance parcourue par l'avalanche : quand une avalanche contient plus de 30 kg d'eau par m³, on parle d'avalanche humide ; le frottement devient faible,

ce qui lui permet de se déplacer plus loin. Par ailleurs, un départ d'avalanche froid et sec se produisant en altitude peut se transformer, plus bas, en un écoulement humide et chaud. Ce nouveau phénomène s'explique par les redoux, induits par le changement climatique, qui provoquent une élévation de l'altitude à laquelle



la température atteint 0°C. On ne sait pas encore modéliser cette transition.

En conséquence, on observe moins d'avalanches dans les Alpes en basse altitude faute de neige, mais davantage plus haut. Cet état de fait est également observé dans l'Himalaya et devrait s'intensifier.

*D'après INRAE 2017
et Sciences et Avenir mars 2020*

De nouvelles formes d'aurores boréales

Les aurores polaires, appelées *boréales* dans l'hémisphère Nord et australes au Sud sont des phénomènes optiques témoignant



de l'activité du Soleil. Outre différentes couleurs, elles peuvent arborer de nombreuses formes et motifs différents. Ainsi, des physiciens de l'Université de l'Iowa ont remarqué, dans une vidéo des années 2000, une nouvelle particularité : des zones d'ombre inattendues (photo de gauche).

De même, un spécialiste Finlandais a appelé "*dunes aurorales*" (photo de droite), le motif, qu'il a pu observer, à plusieurs reprises, en Finlande. Cette forme, jamais encore inventoriée, est due à une



augmentation de la densité des atomes d'oxygène dans une zone spécifique du ciel.

D'après Sciences et Avenir mars 2020 et mai 2021

De l'eau sur la face visible de la Lune

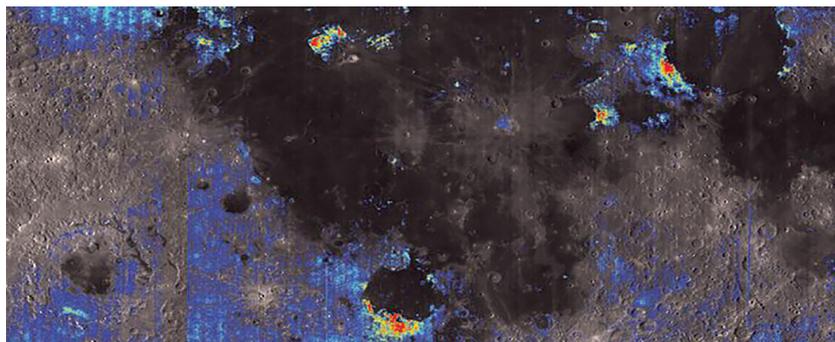
Jusqu'en 2008, on a pensé que la Lune était complètement aride. Puis, les chercheurs ont analysé les perles de verre (photo) issues des missions Apollo et ont découvert les premières traces d'eau connues, mais il était difficile de dire s'il s'agissait de molécules d'H₂O ou d'hydroxyle (OH).

D'où cette eau peut-elle provenir ? Les petites comètes tombant depuis des milliards d'années sur la surface de la Lune ont libéré de la vapeur d'eau en raison de la chaleur dégagée par tout impact sur le sol. Selon des études de 2011, les perles volcaniques présentaient des quantités d'eau semblables à celles de basaltes volcaniques sur Terre (à noter que les profondeurs de notre planète abritent vraisemblablement plus d'eau que l'ensemble des océans, des lacs et des rivières de sa surface !).

Dès lors, les découvertes d'eau lunaire se sont multipliées. On a d'abord pensé que sa présence se limitait aux cratères situés dans l'ombre, mais l'Observatoire stratosphérique d'astronomie infrarouge (SOFIA) de la NASA a détecté des molécules d'eau (H₂O) dans le cratère *Clavius* visible depuis la Terre. Même si les perles de verre ne sont composées que de 0,05 % d'eau, la glace hydrique présente dans

les cratères polaires situés dans l'ombre serait beaucoup plus difficile à atteindre que celle des roches volcaniques disséminées à la surface de la Lune, y compris sur la face éclairée. Peut-être, un jour, des voyageurs pourront-ils extraire cette eau au lieu d'emporter leurs propres réserves sur la Lune !

D'après NASA's Ames Research Center Août 2021



suffisamment de coïncidences à l'échelle d'une saison, afin de se faire une opinion robuste, compte tenu de la grande diversité des événements d'une année à l'autre.

Au cours de la deuxième moitié du XIX^e siècle, la météorologie devient une science. Mais pas à n'importe quel prix. Pour l'astronome français Urbain Le Verrier, pas question de faire des prévisions tant qu'on ne sait pas résoudre les équations, comme on le fait pour les planètes. Pour son homologue britannique l'amiral Robert Fitz-Roy, on peut utiliser le tout nouveau réseau d'observation pour diffuser des prévisions à court terme. Il finira par se suicider, harcelé à la fois par la communauté scientifique et par les usagers mécontents des erreurs de prévision.

Au cours de la première moitié du XX^e siècle, on commence à disposer de suffisamment d'observations pour espérer déterminer des règles empiriques sur des bases solides. La première opération consiste à faire un sort à tous les aphorismes du type « Noël au balcon, Pâques au tison » qui traînent encore dans les almanachs. Il ne faut pas être sévère avec ces dictons à longue échéance qui, à défaut d'une efficacité prédictive, ont eu pendant des siècles une utilité sociale. Face à l'incertitude sur le futur fruit de leur travail, l'inaction des paysans aurait été la pire des solutions : rien de tel qu'un proverbe optimiste pour motiver le laboureur. Au cours de ce demi-siècle, l'anglais Lewis Richardson invente le concept de modèle de prévision, tandis que son compatriote Gilbert Walker découvre l'oscillation australe (un échange de masse entre l'Est et l'Ouest du Pacifique tropical sur plusieurs mois) en cherchant à prévoir l'intensité de la mousson indienne. Leurs travaux seront des échecs sur le moment, mais porteront leurs fruits cinquante ans plus tard. Les Allemands inventent le concept le *grosswetterlage* qu'on

peut traduire par régime de temps, et s'en servent pour effectuer des prévisions à longue échéance par répétition de séquences analogues. Ils basent leurs situations analogues sur le champ de pression atmosphérique en surface sur l'Europe. On sait aujourd'hui que le temps qu'il fera dans trois jours dépend en partie de la situation en altitude aux antipodes. Aussi leurs efforts sont voués à l'échec. Lors d'une conférence internationale dans les années 1980, le grand climatologue allemand Herman Flohn déclara qu'Hitler avait décidé d'envahir l'URSS en été 1941 en fonction, entre autres, d'une prévision d'un hiver 1941-42 particulièrement doux. Or un hiver particulièrement rude a bloqué l'offensive allemande. Flohn affirma qu'il avait prévu un hiver froid, mais n'avait pas été écouté...

La seconde moitié du XX^e marque un tournant. La seconde guerre mondiale a amené les Alliés à construire des calculateurs bien plus complexes que la machine de Pascal, pour déchiffrer les messages ennemis et pour calculer avec précision les tirs de l'artillerie à longue portée. La paix revenue, que faire de ces mastodontes de lampes à diodes où nichent des punaises (bugs en anglais) ? Le mathématicien hungaro-américain John von Neumann, aidé du météorologiste américain Jule Charney, choisit de résoudre les équations de l'atmosphère pour faire trois prévisions météorologiques en 1950. On est encore loin de la prévision saisonnière. Outre la puissance de calcul ridicule de l'ENIAC face aux calculateurs actuels de Météo-France, il manque deux ingrédients en 1950. Le premier ingrédient est une connaissance tridimensionnelle de l'atmosphère sur tout le globe. On commence à peine à effectuer des radiosondages opérationnels sur une grande échelle, et le premier Spoutnik n'a pas encore lancé ses bip-bip. Il faudra attendre le démarrage du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT)

en 1980 pour disposer d'analyses météorologiques globales en temps réel. Le second ingrédient est l'existence de modèles océaniques réalistes sur le globe. Il faudra attendre dix ans de plus. En effet, modéliser l'océan est une tâche bien plus difficile que modéliser l'atmosphère : d'une part, il y a les côtes et les détroits, et, d'autre part, la taille des tourbillons océaniques est plus réduite (10-100 km) que celle des tourbillons atmosphériques (100-1 000 km).

En attendant d'avoir la puissance de calcul suffisante et les outils adéquats, la communauté scientifique se partage entre les méthodes statistiques de prévision, et les approches de faisabilité. Les Américains et les Britanniques proposent des prévisions saisonnières à base de méthodes assez robustes comme la régression linéaire avec un petit nombre de prédicteurs. Cependant la crédibilité de la qualité de leurs prévisions est faible, car, ne disposant de séries d'observations en altitude homogènes sur l'hémisphère Nord tempéré qu'à partir de 1950, leurs scores sont calculés avec les mêmes données que celles qui ajustent leur algorithme statistique. On peut illustrer cela par le proverbe chinois « l'expérience est une lampe accrochée dans le dos qui n'éclaire que le chemin parcouru ». Au pays de Le Verrier, on ne mange pas de ce pain-là chez les météorologistes, et ce sont les chambres d'agriculture et les radios périphériques qui occupent le secteur.

Dans les pays à économie planifiée, la prévision saisonnière est une institution. Deux anecdotes reviennent à la mémoire de l'auteur. Lors d'une visite d'une délégation chinoise au cours des années 1970, Jean-Pierre Labarthe, alors responsable de la division Prévision à moyenne et longue échéance de notre ancienne institution, demande à son homologue chinois « Avec quel type de méthodes faites-vous vos prévisions à longue échéance ? En France,

nous nous contentons de faire de la veille technologique ». Par le truchement de son interprète, le Chinois répond : « Nous faisons des prévisions saisonnières pour répondre aux besoins de l'agriculture ». Au début des années 1990, Robert Vautard, actuel directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL) demande à une collègue hongroise : « ça donnait quoi vos prévisions saisonnières à l'époque soviétique ? ». Notre collègue répond : « On faisait des prévisions tous les mois, on les envoyait au ministère, mais on ne les vérifiait jamais : on n'était pas fou ! »

La modélisation numérique, utilisée pour la simulation du climat dès les années 1960, commence à donner une lueur d'espoir vers le milieu des années 1970. Le Britannique Andrew Gilchrist constate qu'en prolongeant une prévision numérique au-delà de dix jours, les premiers modes

de Fourier, qui correspondent aux grandes ondes sur le globe, conservent une certaine prévisibilité. En 1980, Michel Jarraud au CEPMMT propose d'utiliser les heures de calcul attribuées aux États-membres sur le nouveau ordinateur Cray pour intégrer sur dix ans une version de son modèle atmosphérique, qui deviendra plus tard le modèle opérationnel. À cette époque les plus longues simulations existantes ne dépassent pas une année. Avec M. Jarraud et son collègue Jean-Pierre Volmer à l'Établissement d'Études et de Recherches Météorologiques (EERM, ancêtre du CNRM), l'auteur décide de modifier l'approche d'A. Gilchrist citée plus haut, en remplaçant les modes de Fourier par une décomposition en Composantes Principales (technique statistique connue dans le monde anglo-saxon sous le nom de Fonctions Empiriques Orthogonales, et déjà utilisée par Edward Lorenz, le père de l'effet papillon). Les Composantes Principales (CP)

correspondent bien plus aux modes de variabilité de l'atmosphère que les sinus et cosinus des décompositions de Fourier sur la sphère. Les trois météorologistes constatent que l'évolution sur plusieurs mois des deux premières CP est assez régulière, loin du chaos apparent de l'évolution météorologique de la température ou de la pression à une station. Jean Clochard, élève-ingénieur de la météorologie en stage de fin d'étude sous la supervision de l'auteur, effectue un jeu de prévisions à 45 jours avec les analyses globales de 1979 et 1980 ramenées du CEPMMT par bandes magnétiques (l'internet que nous connaissons aujourd'hui n'existe pas encore). Nous constatons que les trois premières CP conservent des scores de prévision positifs au cours des 45 jours.

En 1981, l'indo-américain Jagdish Shukla fait une découverte qui orientera les recherches futures jusqu'à la fin du siècle dernier : l'essentiel du potentiel de

Photo 3 : Anse Source d'Argent



prévisibilité atmosphérique vient de la température de surface des océans tropicaux, notamment de l'océan Pacifique [photo 3]. La décennie 1980 est consacrée à la Dynamical Extended-Range Prediction (DERF, prévision dynamique à échéance étendue) où s'illustrent Américains, Britanniques, Canadiens, Japonais et Français. Le principe de cette approche est de limiter de 30 à 60 jours les prévisions atmosphériques en maintenant constantes les températures de surface de la mer à leur valeur initiale. En 1982-83 un fort événement El Niño (anomalie chaude durant tout l'hiver dans le Pacifique équatorial) permet de valider cette approche. Mais ce n'est pas tout à fait de la prévision saisonnière.

En 1990 apparaissent en Allemagne, aux USA et au Royaume-Uni les premiers modèles couplés océan-atmosphère. Cela permet au tout nouveau Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) d'utiliser les résultats des premiers scénarios de changement climatique. Mais pour faire des prévisions saisonnières, il manque encore la connaissance de l'état initial de l'océan. En 1992, la NASA et le CNES lancent le satellite d'observation altimétrique TOPEX-POSEIDON. [image 1]. La connaissance du relief de l'océan permet de savoir si une température de surface chaude, telle que peut l'observer un satellite comme Météosat, correspond à un simple phénomène superficiel ou à une couche d'eau chaude épaisse de plusieurs dizaines de mètres. En attendant les algorithmes capables de reconstituer un état tridimensionnel de l'océan, en 1995, Jean-Claude André, alors Directeur du CNRM, relance l'idée de Michel Jarraud 15 ans plus tôt de mettre en commun pour une expérience lourde les ressources de calcul du CEPMMT accordées aux États-membres. Les modèles du CEPMMT, du MetOffice et de Météo-France sont utilisés pour produire des re-prévisions sai-



Image 1 : satellite TOPEX-Poseidon

sonnières pour les années 1979-1993. Faute de modèle océanique, on impose à l'atmosphère les températures de surface de l'océan réellement observées. Il ne s'agit donc que de prévisibilité potentielle, mais si les scores s'avèrent mauvais, il sera vain de poursuivre avec les modèles couplés océan-atmosphère qui commencent à apparaître sur le marché. La Commission Européenne soutient financièrement ce projet, nommé PROVOST, qui inclut, outre les trois producteurs de prévision cités plus haut, des utilisateurs potentiels de prévisions comme EDF. Deux ans plus tard, les scores de ces « prévisions » sont à la hauteur des espérances. On peut donc se lancer dans une production en temps réel. En France, c'est MERCATOR-Océan qui s'occupe de l'océanographie opérationnelle, le CNRS fournissant le modèle océanique, et le CERFACS (Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique) assurant le couplage océan-atmosphère, comme il le fait pour les scénarios climatiques.

Au début de l'automne 1997, tous les modèles couplés prédisent un événement El Niño fort, tandis que le modèle statistique américain le plus en vue à l'époque ne voit qu'un hiver normal. L'hiver 1997-98 sera le deuxième El Niño du XX^e siècle, après celui de 1982-

83 déjà mentionné. Désormais, la confiance dans la prévision numérique est assurée. Pierre Bessemoulin, Directeur de la climatologie, lance en 1999 un bulletin mensuel de prévisions saisonnières, où il collecte les prévisions et les observations disponibles, et les met à disposition sur un site http. Pour consolider la confiance des utilisateurs dans ce nouveau type de prévisions, Tim Palmer du CEPMMT, qui avait assuré la coordination du projet PROVOST, monte un projet de re-prévision plus ambitieux. Il y a maintenant cinq modèles couplés en lice, dont celui des Allemands de Hambourg et des Italiens de Bologne, pour couvrir la période 1958-2002. Chaque modèle doit produire 9 prévisions à échéance 6 mois. Comme attendu, les scores sont moins élevés que dans PROVOST, mais ils restent majoritairement positifs, sont plus robustes, du fait de la taille des échantillons, et surtout plus représentatifs d'une prévision en temps réel. On estime même qu'ils leur sont inférieurs, à cause de la moindre qualité des états initiaux océaniques, du fait de l'absence de données altimétriques dans cet exercice de re-prévision. Le projet, financé par la Commission Européenne, se nomme DEMETER et s'étend de 2001 à 2003. Il laisse une base de données de prévision ouverte en libre accès, et démontre que lorsqu'on combine les prévisions de plusieurs modèles, on obtient un gain de prévisibilité.

Les résultats de DEMETER stimulent la communauté scientifique. Les Américains lancent à leur tour un US-DEMETER. Le CEPMMT lance le projet EURO-SIP qui vise à produire chaque mois en temps réel un ensemble de prévisions constitué des apports des modèles du CEPMMT, du MetOffice, et de Météo-France. Ces prévisions sont diffusées aux États-membres, et un sous-ensemble des produits est disponible en accès libre. Ce projet va durer presque 20 ans et agrégera progressivement les prévisions