

Paris, mars 2006

Rapport final du projet GICC-MedWater (mars 2003/février 2006)

Impacts du changement climatique sur le
cycle hydrologique du bassin méditerranéen

Participants:

P1: CNRS/IPSL/LMD

Institut Pierre-Simon Laplace
Laboratoire de Météorologie Dynamique
Paris

P2: CNRS/IPSL/LODYC

Institut Pierre-Simon Laplace
Laboratoire d'Océanographie Dynamique et de Climat
Paris

P3: CNRS/IPSL/LSCE

Institut Pierre-Simon Laplace
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
Gif-sur-Yvette

P4: Météo-France/CNRM

Centre National de la Recherche Météorologique
Toulouse

P5: BDSI, Université de Perpignan

P6: GIP Médias-France, Toulouse

Coordinateur:

Monsieur Laurent LI

Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD)
Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), CNRS
Université Pierre et Marie Curie, case courrier 99
4 place Jussieu, 75252 Paris cedex 05
tél: 01 4427 8409; fax: 01 4427 6272
mél: li@lmd.jussieu.fr

Table des matières

1. Introduction
 2. Objectifs du projet
 3. Méthodologie
 4. Résultats scientifiques
 - 4.1 Validation des modèles et diagnostic du climat régional
 - 4.2 Circulation thermohaline de la Méditerranée et sa sensibilité aux forçages atmosphériques
 - 4.3 Ecosystème de la Méditerranée
 - 4.4 Réalisation de scénarios régionaux du climat
 - 4.5 Sensibilité de la circulation thermohaline au réchauffement global
 5. Base de données et site web
 6. Publications en relation avec le projet
 7. Quelques événements en relation avec le projet
 8. Conclusions et perspectives
- Tableaux (4)
Figures (17)

1. Introduction

Dans la perspective d'un réchauffement global du climat, la gestion des impacts du changement climatique passe d'abord par une connaissance précise des caractéristiques du changement à l'échelle régionale. Pour le bassin de la Méditerranée, outre la variation en température, la variation des ressources en eau est un facteur déterminant pour répondre à un certain nombre de préoccupations à caractère socio-économique.

La régionalisation de scénarios climatiques dans le cadre du réchauffement global est l'étape incontournable pour mener des études sur les impacts du changement climatique. Durant ces dernières années, des avancées significatives ont été obtenues dans la modélisation du climat à haute résolution qui se rapproche, petit à petit, de l'échelle régionale, fournissant ainsi une opportunité remarquable pour étudier les comportements régionaux du climat.

Le projet GICC-MedWater étudie le climat du bassin méditerranéen. Cette région est une région très peuplée et active où les incidents climatiques peuvent entraîner d'importantes conséquences économiques. Sur le plan climatique, la Méditerranée est une zone de transition entre un climat chaud et sec au sud et un climat doux et humide au nord. Elle est donc très sensible et vulnérable au changement climatique. L'étude du climat constitue donc un enjeu important de la société de cette région.

Dans l'état actuel de la recherche scientifique, les prévisions des différents modèles globaux sont concordantes à l'échelle continentale, mais elles divergent nettement dans leurs détails aux échelles locales, voire régionales. Néanmoins, une certaine cohérence parmi les différents modèles a été trouvée sur la région Europe - Méditerranée et les tendances réellement observées corroborent les résultats modélisés. Lors d'un réchauffement global, l'anticyclone des Açores semble se renforcer et s'étendre sur une zone plus large. Sous l'influence de l'anticyclone, le bassin méditerranéen connaît une diminution des pluies. Le gradient méridien de pression sur l'Atlantique du nord est aussi renforcé, tout comme le gradient méridien de température dans les hautes couches de l'atmosphère. Ceci a pour effet de renforcer la route dépressionnaire nord-atlantique et de décaler cette zone de dépression vers le nord. Ainsi des perturbations qui arrivent sur le nord du continent européen sont plus nombreuses et plus fortes. Le nord de l'Europe voit donc une augmentation de pluie. Le contraste hydrologique entre le nord et le sud de l'Europe est ainsi accentué.

2. Objectifs du projet

Le projet GICC-MedWater se place dans le cadre de régionalisation des scénarios climatiques et il étudie les caractéristiques du réchauffement climatique pour le bassin méditerranéen à l'aide des derniers progrès de la modélisation numérique. L'objectif principal est donc de proposer des scénarios de l'évolution du climat, régionalisés sur le bassin de la Méditerranée. Les impacts sur la circulation générale et la biologie de la Méditerranée font partie du champ d'étude de MedWater. Le projet comprend aussi un volet important sur la validation des modèles utilisés afin d'avoir une argumentation scientifique pour juger la qualité des scénarios obtenus.

GICC-MedWater est focalisé sur la composante atmosphérique du bilan d'eau de la Mer Méditerranée et les conséquences sur la circulation générale marine. La Méditerranée est un

bassin de concentration, c'est-à-dire, l'évaporation (estimée à 1100 mm/an) est largement supérieure à la précipitation (400 mm/an) et le débit des rivières (8100 m³/s, équivalent à 100 mm/an). L'existence d'une circulation thermohaline constitue donc une caractéristique particulière de la Méditerranée: la formation des masses d'eaux profondes est observée dans le Golfe du Lion, la Mer Adriatique, la Mer Egée et le bassin Levantin. La convection méditerranéenne détermine aussi l'apport des nutriments pour les activités biologiques marines. Une connaissance sur la convection méditerranéenne et sur sa variation en réponse du réchauffement global apportera donc des arguments scientifiques pour la gestion de l'écosystème marin.

3. Méthodologie

Autour des objectifs définis ci-dessus, GICC-MedWater entreprend trois actions principales qui rendent le projet équilibré entre la recherche scientifique et son application. La première est une action de recherche appliquée qui consiste à produire les informations climatiques et à mener les études d'impact. La deuxième action est de soutenir le développement de la modélisation de l'écosystème marin. La troisième action est de soutenir la validation de modèles à travers certaines études qui s'inscrivent davantage dans la recherche fondamentale.

GICC-MedWater utilise une série d'outils qui ont été récemment développés pour modéliser les différentes composantes du système climatique régional du bassin méditerranéen.

Les modèles impliqués sont d'abord les deux modèles globaux couplés développés en France, celui de Météo-France/Cerfacs et celui de l'IPSL qui ont, tous les deux, produit des scénarios du changement climatique de type IPCC-A2. La régionalisation du climat se fait à travers deux modèles atmosphériques à maille variable, Arpège-climat (Fig. 1, à droite) et LMDZ (Fig. 1, à gauche). La modélisation de la circulation générale de la mer Méditerranée utilise le modèle océanique OPA dans une configuration régionale, MED8 (huitième de degré) avec 43 niveaux en verticale dont la bathymétrie est montrée en Figure 2. La biogéochimie utilise le modèle PISCES développé au LODYC pour l'océan global et également adapté pour la Méditerranée.

La modélisation de l'écosystème marin était dans une phase moins mature de son développement. Mais elle ouvre des perspectives pour d'autres études d'impacts concernant la biologie marine dans les régions côtières ou au large.

La validation des modèles dans le contexte du climat régional est une composante importante de notre projet. La validation de modèles numériques révèle souvent leur imperfection mais nous pouvons ainsi acquérir une argumentation scientifique pour juger la qualité des résultats obtenus et proposer des améliorations aux modèles numériques.

4. Résultats

4.1 Validation des modèles et diagnostic du climat régional.

4.1.1 Guidage atmosphérique et validation du modèle destiné aux études régionales

Le modèle LMDZ en mode guidage est utilisé pour effectuer sa validation contre les données observées. Ce travail a été fait en collaboration avec G.L. Liberti du CNR/ISAC à Rome.

La possibilité de guider le modèle zoomé par des analyses météorologiques ouvre de nouvelles perspectives car elle permet d'une part d'effectuer des simulations de type météorologique confrontables avec les observations instantanées et d'autre part de s'affranchir des incertitudes liées à la circulation de grande échelle permettant de se concentrer sur la physique du modèle. Le but ici est de comprendre et d'analyser la physique du modèle pour des applications climatiques. Pour cela, il est nécessaire de s'assurer que l'on peut mettre au point un guidage qui ne la contraigne pas trop. Nous avons mené une étude de la sensibilité des résultats à l'intensité du guidage, au type de variable guidée et à l'extension de la zone de guidage ou de non guidage.

Ces travaux concernent principalement la nébulosité car c'est une variable essentielle pour la sensibilité climatique, elle est l'objet de nombreuses observations et enfin elle renseigne sur le fonctionnement du cycle de l'eau dans l'atmosphère. Outre des tests sur la position du zoom, deux tests principaux ont été effectués: l'un en guidant fortement la température et le vent sur l'ensemble du globe, l'autre en effectuant le guidage uniquement à l'extérieur de la région méditerranéenne. Ces simulations ont été confrontées aux observations METEOSAT pleine résolution pour un mois particulier d'une part et aux observations METEOSAT échantillonnées et traités selon l'approche ISCCP-DX (toutes les 3 heures, 1 pixel tous les 30km). Différents diagnostics ont été développés en suivant une approche eulérienne (la zone méditerranéenne est divisée en sous régions et on s'intéresse aux nuages qui sont dans la sous-région, sans les suivre). De ces diagnostics nous avons pu conclure que

- Les 2 types de guidages donnent des résultats peu différents.
- Les champs simulés et observés se comparent en général bien, à part dans les détails. Toutefois les performances sont meilleures en hiver qu'en été. Cela peut être dû à un rôle plus important l'été des petites échelles moins bien représentées dans le modèle.
- Il est possible que le modèle ait tendance à surestimer les nuages élevés et à sous estimer les nuages bas.
- Les produits (couverture nuageuse) ISCCP-DX surestiment systématiquement la couverture nuageuse sur la région méditerranéenne. Ceci conduit à penser qu'il faut envisager une re-calibration de ce jeu de données si on veut pouvoir l'utiliser à l'échelle régionale.

Ces travaux de validation se poursuivent, d'une part en étendant les diagnostics à d'autres variables caractérisant la nébulosité comme la pression du sommet des nuages et l'épaisseur optique et d'autre part en explorant une voie lagrangienne où l'on cherche à suivre les systèmes nuageux.

Les bonnes performances des simulations zoomées mais guidées uniquement à l'extérieur du domaine méditerranéen vont nous permettre également d'utiliser LMDZOR pour améliorer la résolution spatiale des simulations

- du climat régional actuel en guidant LMDZOR à l'extérieur du domaine par des ré-analyses
- des scénarios climatiques produits par le modèle de climat global (IPSL-CM4) dans le cadre de IPCC à basse résolution spatiale en guidant une fois encore à l'extérieur du domaine par les scénarios.

Une voie originale à explorer est le guidage du modèle LMDZOR zoomé sur la Méditerranée par des champs issus d'expériences de changement climatique effectuées à l'échelle globale avec des modèles couplés. L'utilisation de LMDZOR en mode guidé et zoomé pour

comparer les simulations du modèle aux observations effectuées une année durant au SIRTa d'une part et pour évaluer la nébulosité sur l'ensemble du bassin Méditerranéen pour un mois entier nous rendent confiants sur la faisabilité de la méthode. Néanmoins, il est nécessaire d'évaluer plus largement les performances de cette approche dans le cadre du climat actuel pour savoir comment les mécanismes connus de variabilité du climat méditerranéen sont restitués par ce type de simulations.

4.1.2 Downscaling climatique dans la région méditerranéenne

La descente d'échelle de l'information climatique, à travers un modèle avec zoom, est l'approche adoptée dans GICC-MedWater pour étudier les impacts régionaux du changement climatique. Pour avoir une évaluation sur la validité de cette approche, une expérience de 10 ans (1991/2000) a été effectuée avec LMDZOR guidé par les ré-analyses ERA40. La résolution du modèle est de 120x90x19 avec un zoom sur la Méditerranée (15° E/40°N) de facteur 6 en longitude et 4 en latitude. La résolution spatiale sur la Méditerranée est de 50 km.

Figure 3 montre la nébulosité du modèle en nuages haut, moyen et bas respectivement. La nébulosité observée issue des données spatiales est aussi tracée pour évaluer le réalisme du modèle. On peut voir que le modèle est assez réaliste en termes de nébulosités haute et moyenne. En revanche, pour la nébulosité basse, l'écart entre le modèle et l'observation est grand. L'observation révèle une forte nébulosité basse en Méditerranée, en Mer Noire et en Atlantique, tandis que le modèle ne simule pratiquement pas de nébulosité sur la surface aquatique du domaine et qu'il simule de la nébulosité sur le relief. Ceci montre très certainement que le schéma de couche limite n'est pas suffisamment performant pour produire des nuages bas. Ceci semble un problème général pour la plupart des modèles du climat.

Comme pour la nébulosité basse, la précipitation produite par le modèle est aussi très abondante sur le relief du domaine. Figure 4 compare la précipitation simulée et la précipitation fournie par le projet GPCP, à base des données spatiales. L'observation est donnée sur une grille de 2.5°, on ne voit pas très bien les détails de la distribution géographique. La comparaison modèle/observation est globalement satisfaisante.

4.1.3 Dernier maximum glaciaire comme un cas de validation

Tester la modélisation dans la configuration d'un climat avéré du passé constitue une validation intéressante des modèles pour juger leurs capacités à prévoir le climat du futur. Les travaux déjà rapportés l'an dernier concernaient essentiellement le climat du DMG (dernier maximum glaciaire, il y a 21000 ans) en Méditerranée dans une version à très haute résolution du modèle LMDZ. La problématique était de savoir si un modèle à haute résolution pouvait simuler les températures et précipitations glaciaires de manière plus satisfaisante que les modèles moyenne et basse résolutions (voir les résultats du projet PMIP, Paleoclimate Modelling Intercomparison Project, reportés dans Kageyama et al, 2001). Les résultats ont montré que la résolution du modèle atmosphérique apportait une nette amélioration dans la simulations de l'assèchement de la zone méditerranéenne et en Europe de l'Ouest, mais que la simulation du refroidissement hivernal, sous-estimé dans tous les modèles moyenne et basse résolution, l'était également dans le modèle haute résolution.

Nous nous sommes aussi intéressés aux changements de la Mer Méditerranée elle-même pendant le DMG. En collaboration (deux réunions de travail ont eu lieu à Londres en décembre 2004 et à Paris en mars 2005) avec les collègues qui ont reconstitué la température superficielle de la Méditerranée au DMG, nous avons préparé les conditions aux limites nécessaires pour pouvoir tourner le modèle océanique MED8. D'autre part, la bathymétrie du modèle a été aussi modifiée pour prendre en compte la baisse du niveau de la mer (de l'ordre de 120 mètres) au DMG. Nous préparons également les forçages en ruissellement, largement modifié pendant cette période.

Cette expérience à fine résolution sur l'Europe du Climat du Dernier Maximum Glaciaire a été utilisée comme état de base pour une expérience de sensibilité à un événement froid (l'événement de Heinrich 1) qui a été comparé à des données polliniques en Mer d'Alboran (Kageyama et al, 2005). En outre, dans le cadre de la thèse de Anne Jost (soutenue en juillet 2005), une expérience avec la même configuration du modèle mais en climat chaud (période du Pliocène Moyen, il y a environ 3 millions d'années) a été effectuée et comparée à des reconstructions polliniques (collaboration avec S. Fauquette à Montpellier, publication en cours de préparation).

4.2 Circulation thermohaline de la Méditerranée et sa sensibilité aux forçages atmosphériques.

L'existence d'une circulation de retournement et de la formation de masses d'eau profonde, pilotée par le forçage thermohalin, est un caractère particulier de la circulation générale de la Mer Méditerranée. Plusieurs facteurs contribuent à la formation d'eau profonde. Tout d'abord, les structures cycloniques de la circulation horizontale jouent un rôle de pré-conditionnement (pompage d'Ekman, remontée des isopycnes, isolation des masses d'eau) en forçant de l'eau dense à rester sur place et à ne pas être advectée vers l'extérieur. Le deuxième ingrédient est la présence de forts flux atmosphériques, flux de chaleur, flux d'eau et tension du vent. Les convections produites au large du Golfe du Lion et en Mer Adriatique sont particulièrement sensibles aux événements de Mistral et de Bora qui créent un fort refroidissement par évaporation et perte de chaleur sensible ainsi qu'un apport énergétique turbulent dû au frottement du vent. Ces vents soufflent violemment de la terre vers la mer en contournant les Alpes. On peut intuitivement penser que la performance d'un modèle de la circulation générale de la Méditerranée devrait être très sensible aux forçages atmosphériques et en particulier aux intensités de la tension du vent.

Ceci a été récemment confirmé dans le modèle de circulation générale OPA, version Méditerranée, à la résolution de 1/8 degré (MED8) ou de 1/16 degré (MED16). Seulement les résultats de MED8 seront montrés, mais les résultats de MED16 confirment ceux de MED8. Deux jeux de forçages atmosphériques ont été utilisés, issus des analyses opérationnelles (50 km pour ECMWF) effectuées à ECMWF et des réanalyses ERA40 (120 km pour ERA40) aussi effectuées à ECMWF. 9 ans (1990-1999) de simulation ont été effectués avec des forçages ERA40 et 8 ans avec des forçages ECMWF (période 1998-2002 répétée deux fois). Les résultats montrent que ERA40 est incapable de créer de la convection tandis que ECMWF peut en produire. Les périodes respectives de ces forçages étant distinctes, la comparaison de ces jeux de données ne peut se faire que qualitativement. La Figure 5 montre l'évolution de la profondeur maximale de couche de mélange dans le Golfe du Lion et dans le bassin Levantin. On peut facilement constater que la couche de mélange est beaucoup plus profonde avec le forçage ECMWF qu'avec ERA40. Ceci peut-être imputer à la plus forte intensité des tensions de vent du forçage haute

résolution ECMWF (Fig. 6a). En effet, bien que les structures spatiales de vent soient présentes dans le forçage ERA40 (Fig. 6b), leurs intensités sont sous-estimées en raison du lissage dû à la moindre résolution. Ceci ne permet donc pas à MED8 de reproduire des profondeurs de convection observées.

Ce résultat est également confirmé par une étude de S. Marullo (communication privée) qui compare ces deux jeux de données avec les vents mesurés par les instruments installés sur les flotteurs dans trois sites différents de la Méditerranée.

Comme présenté un peu plus tard, le même modèle MED8 peut produire de la convection profonde quand le forçage du modèle Arpège est utilisé avec une résolution également à 50 km sur la Méditerranée. On peut donc raisonnablement généraliser ces résultats et conclure que la résolution de 50 km est sans doute une résolution nécessaire d'un modèle atmosphérique pour pouvoir simuler correctement la circulation thermohaline de la Méditerranée.

On peut illustrer ce résultat en prenant le site de convection profonde du bassin ouest où une bonne résolution du relief est essentielle pour le vent. Plus précisément, la séparation entre les Alpes et le Massif Central permet de créer l'effet de canalisation (vallée du Rhône) qui intensifie le Mistral. Il en est de même pour la Tramontane qui n'est représentée dans les modèles que si le Massif Central est séparé des Pyrénées. Dans les 2 cas, cette séparation des reliefs n'est pas réalisée à 100 km de résolution mais elle l'est à 50 km.

4.3 Ecosystème de la Méditerranée.

Notre but est d'estimer le rôle de l'activité humaine et du changement climatique dans le fonctionnement de l'écosystème marin de la Méditerranée, notamment à travers de la séquestration du carbone atmosphérique excédentaire. Il est nécessaire de comprendre d'abord la variabilité des flux bio-géochimiques aux différentes échelles spatio-temporelles en utilisant des simulations numériques tri-dimensionnelles associées avec des validations par des données in-situ (TCO₂, ...) ou des données de couleur de l'océan obtenues par télédétection (SeaWifs, Meris, ...).

Une des tâches principales de GICC-MedWater est donc de construire un modèle de productivité marine de toute la mer Méditerranée avec une focalisation sur le cycle du carbone. Deux modèles ont été mis au point. Le premier est le modèle PISCES qui traite la production primaire et la chimie du carbone. Le deuxième modèle est TROCA, une version simplifiée de l'écosystème Méditerranéen. Actuellement, le modèle PISCES a été couplé au modèle MED8 avec succès et une première simulation de test a été déjà réalisée (voir le rapport du LODYC "Implémentation des traceurs dans OPA", Ch. Ethé). La Figure 7 montre la production primaire simulée par le modèle pour avril et juillet 2000.

4.4 Réalisation de scénarios régionaux du climat

Notre étude porte sur la régionalisation du changement climatique et les impacts associés. Nous devons tout d'abord effectuer deux choix préalables qui se situent en amont de notre projet. Le premier est le choix des scénarios d'émission des gaz à effet de serre et le deuxième est le choix des scénarios du climat global. En ce qui concerne les scénarios d'émission, nous avons choisi le scénario A2, établi par l'IPCC. Ce scénario se situe dans la fourchette haute des scénarios issus des considérations sur l'économie, l'innovation technologique et la politique. Mais il est plutôt réaliste vis-à-vis de la situation actuelle. Ainsi

nous pouvons concentrer nos efforts sur les incertitudes liées aux processus physiques des modèles globaux dont le nombre s'élève à trois dans le projet GICC-MedWater. Ces scénarios du changement climatique global ont été obtenus respectivement à l'IPSL, au CNRM (Météo-France), et au GFDL (aux Etats-unis).

En ce qui concerne la régionalisation proprement dite, le projet GICC-MedWater utilise deux modèles atmosphériques (voir Fig. 1 pour leurs mailles) qui ont vocation à rendre compte du climat régional: LMDZ-Méditerranée et Arpège-Méditerranée. Ces deux modèles sont globaux mais à maille variable, le centre du zoom étant bien évidemment sur la Méditerranée. Arpège-Méditerranée a une résolution horizontale de 50 km dans la région, tandis que le LMDZ-Méditerranée est à la résolution de 160 km. La version du modèle LMDZ-Méditerranée à résolution de 80 km, utilisée au début du projet (voir les résultats de la première année) a été finalement abandonnée, faute de puissance informatique suffisante. En outre, l'évaluation de ce modèle en mode paléoclimatique (simulation du climat du Dernier Maximum Glaciaire) a montré des résultats similaires au modèle basse résolution (environ 400 km) pour ce qui est de la température, et des résultats se rapprochant davantage des reconstructions paléoclimatiques pour ce qui est des précipitations annuelles. Cependant le biais chaud et humide pour cette période climatique demeure, de même que dans d'autres modèles haute-résolution sur la région Méditerranée (Jost et al., 2005, Climate Dynamics). L'utilisation du LMDZ à basse résolution nous a permis de réaliser un ensemble de simulations, utile pour mieux apprécier la dispersion des résultats, donc la confiance à accorder aux résultats.

LMDZ-Méditerranée a été tourné en mode climatologique, avec les conditions aux limites (la température de l'océan superficiel, l'extension de la glace de mer et les concentrations des gaz à effet de serre) correspondant au climat observé entre 1979 et 1999. Ceci produit notre climat de référence (notée LMDZ/CTRL). Pour le climat futur, nous avons sélectionné la fin du 21e siècle (2070/2099). Les conditions aux limites de ces deux périodes ont été moyennées séparément avant de forcer le modèle LMDZ toujours en mode climatologique. Notre approche est plus couramment référencée comme "time slice" (tranche du temps). Toutes les simulations avec LMDZ-Méditerranée sont récapitulées dans le Tableau 1 où les trois simulations de scénarios sont notées respectivement LMDZ/IPSL, LMDZ/CNRM et LMDZ/GFDL.

Pour corriger les biais des modèles globaux dans leur reproduction du climat actuel, nous adoptons l'approche différentielle, c'est-à-dire que la variation entre le climat actuel modélisé et le climat futur modélisé est ajoutée aux conditions aux limites observées pour l'actuel (la température de l'océan superficiel, l'extension de la glace de mer, la concentration des gaz à effet de serre) pour produire les conditions aux limites "futurées" afin de forcer le modèle de régionalisation. Cette approche différentielle, qui manipule les variables en anomalie, peut s'appliquer assez directement sur la température de l'océan superficiel et la concentration des gaz à effet de serre. Mais elle pose parfois des difficultés pour traiter la glace de mer qui est une variable bornée entre 0 et 1 pour chaque maille du modèle.

Nous avons finalement choisi la méthode d'analogie pour traiter la glace de mer. Nous divisons la terre en N secteurs géographiques et nous calculons la couverture englacée de chaque secteur et tous les mois (sans considérer les saisons) pour la période 1979/2000 pour laquelle l'observation existe. Ainsi nous avons, pour chaque secteur, une relation de correspondance entre un tableau "indice" contenant la superficie englacée et un autre tableau "carte" contenant la distribution géographique de la glace. En connaissant la couverture de glace simulée pour le climat actuel, la couverture simulée du climat futur et la

couverture observée du climat actuel, on peut proportionnellement calculer la couverture future à utiliser comme forçage. Avec cette dernière et la relation de correspondance, on déduit la distribution géographique de la glace à utiliser dans le modèle de régionalisation comme forçage du climat futur. Le choix des secteurs devrait considérer la distribution actuelle de la glace et sa dynamique de variation. Actuellement, nous utilisons seulement deux secteurs: hémisphère nord et hémisphère sud. Quand la plage dynamique offerte par la variation saisonnière et inter-annuelle de la glace de mer n'est plus suffisante pour se servir d'une analogie, c'est-à-dire, la superficie de glace est supérieure à la valeur maximale ou inférieure à la valeur minimale, on est amené à faire artificiellement progresser ou diminuer le volume de glace suivant la géométrie longitudinale de chaque point du front de glace.

La Figure 8 montre la variation de la SST et de la fraction de glace de mer dans les trois scénarios globaux IPSL, CNRM et GFDL. On peut constater que le scénario IPSL possède un réchauffement moins important et que les scénarios CNRM et GFDL un réchauffement plus fort. Les océans tropicaux se réchauffent d'environ 2°C dans IPSL, mais de 2 à 3°C dans CNRM et GFDL. Les océans de hautes latitudes se réchauffent moins, avec une amplitude de 0 à 1°C pour IPSL et 0 à 2°C pour CNRM et GFDL. On remarque que le réchauffement est très faible pour l'océan austral, même un refroidissement est observé dans les scénarios IPSL et CNRM. Ceci est dû à une modification de la formation d'eau de fond antarctique. Un refroidissement est également observé pour l'Atlantique nord, certainement lié aussi à la circulation thermohaline atlantique.

A Météo-France, la régionalisation du climat a été réalisée avec Arpège-Méditerranée dont une portion de la grille est montrée en Figure 1. Contrairement à l'approche "time-slice" utilisée à l'IPSL, Arpège-Méditerranée tourne sur la période entière de l'expérience globale, soit de 1960 à 2099. Pour que les résultats soient les plus comparables possibles entre LMDZ et Arpège, nous analysons ici principalement la fin de la simulation transitoire, vers la fin du 21e siècle. La simulation de contrôle est notée Arpège/CTRL et celle de scénario Arpège/CNRM (voir Tableau 1). On insiste ici sur le fait que le scénario global CNRM est utilisé dans les deux modèles de régionalisation LMDZ-Méditerranée et Arpège-Méditerranée.

La Figure 9 montre la variation de température à 2 mètres (colonne de gauche, °C) et de précipitation (colonne de droite, mm/jour), simulée par le modèle LMDZ-Méditerranée. Les quantités montrées sur ce graphique représentent la moyenne annuelle. Pour la température, la structure spatiale de ces trois scénarios régionalisés est assez semblable, avec un réchauffement de 2 à 3°C sur la mer et de 3 à 4°C sur la terre qui entoure la Méditerranée. On peut remarquer quand-même que le scénario LMDZ/IPSL est légèrement moins chaud que le scénario LMDZ/GFDL et que le scénario LMDZ/CNRM se trouve au milieu.

Pour la précipitation, une variable plus importante que la température pour la région Méditerranéenne, il y a une augmentation générale pour le nord de l'Europe, mais une diminution pour une large partie de l'Europe du sud et du bassin Méditerranéen. Ce résultat semble cohérent avec la plupart des modèles utilisés récemment pour évaluer le changement climatique en Europe (le projet européen PRUDENCE, notamment). Quelques centres de diminution se trouvent au nord d'Espagne, au sud de France, sur la terre entre la Mer Adriatique et la Mer Egée, et en Turquie. L'amplitude de la diminution est relativement faible dans le scénario LMDZ/GFDL (-0.1 mm/jour), mais très grande dans LMDZ/IPSL et LMDZ/CNRM (environ -0.6 mm/jour).

Une situation similaire est obtenue dans Arpège en ce qui concerne la précipitation. La Figure 10 montre la variation relative, entre Arpège/CTRL et Arpège/CNRM, des précipitations pour les quatre saisons séparées. On peut voir que l'assèchement du bassin Méditerranéen est une tendance générale.

Le cycle hydrologique est un élément fondamental du climat régional en Méditerranée. La Mer Méditerranée est un bassin de concentration avec un taux d'évaporation beaucoup plus important que celui de précipitation. Le cycle saisonnier est aussi très marqué. La Figure 11 montre les variations saisonnières de la partie atmosphérique du cycle hydrologique: évaporation (E), précipitation (P) et déficit d'eau (E-P). La partie en haut du graphique est le résultat du modèle LMDZ pour la simulation de contrôle et la partie en bas les estimations faites à partir des jeux de données observées (Mariotti et al. 2002, J. of Climate). Les valeurs en moyenne annuelle sont également tracées dans la boîte de légende. Le cycle saisonnier de la précipitation est très réaliste avec un minimum en juillet-août et un maximum en novembre-décembre. Mais la valeur moyenne de la précipitation semble un peu sous-estimée par le modèle. L'évaporation du modèle est, en revanche, sur-estimée. Et le cycle saisonnier présente aussi un décalage d'un mois: le minimum arrive en mai dans les observations, mais en juin dans le modèle. En conséquence, le déficit d'eau (E-P) est sur-estimé et le décalage d'un mois est aussi visible.

Pour les trois scénarios du futur réalisés par le modèle LMDZ-Méditerranée et un scénario réalisé par le modèle Arpège-Méditerranée, le Tableau 2 liste les variations en moyenne annuelle et totale de ces éléments du cycle hydrologique. Tous les scénarios montrent une diminution du taux de précipitation. L'évaporation augmente pour LMDZ/IPSL, LMDZ/CNRM et Arpège/CNRM, mais elle a une légère diminution non-significative dans LMDZ/GFDL. Le déficit net d'eau de la Méditerranée est donc augmenté dans les quatre scénarios, de 10% dans LMDZ/IPSL, 14% dans LMDZ/CNRM, 1,3% dans LMDZ/GFDL et 20% dans Arpège/CNRM. Le dernier rang du tableau montre le gain en flux de chaleur, par rapport à la simulation de contrôle. On peut voir que la Méditerranée, dans le cas du modèle LMDZ-Méditerranée, au lieu de perdre de la chaleur vers l'atmosphère (-2,1 W/m²), gagne de l'énergie de l'atmosphère pour les scénarios futurs. Ce gain net varie de 3,6 à 11,9 W/m² pour les différentes simulations. Dans le cas du modèle Arpège-Méditerranée, la Mer perd de la chaleur vers l'atmosphère de l'ordre de -32,7 W/m² pour le scénario, mais -37,6 W/m² pour le contrôle, un gain net de 4,9 W/m² est donc obtenu.

Quand la simulation de scénario Arpège/CNRM est comparée à la simulation de contrôle Arpège/CTRL, non seulement la précipitation sur la Méditerranée est diminuée (comme dans les trois cas du LMDZ), mais aussi le débit des fleuves qui se jettent dans la Méditerranée. En revanche, l'évaporation est fortement augmentée, le bilan d'eau devient donc plus déficitaire, comme montré dans Figure 12.

Au niveau global de la Méditerranée, la perte d'eau est plus importante dans Arpège surtout à cause de l'évaporation qui réagit plus fortement dans Arpège que dans LMDZ. A noter que lorsqu'on rajoute l'impact sur les fleuves, on obtient un E-P-R qui varie de +250 mm/an car le débit des fleuves diminue de 36%. Dans le scénario ARPEGE-Méditerranée, l'augmentation du terme E-P-R est dû à 25% pour la variation du débit des fleuves, 25% pour la variation des précipitations et 50% pour la variation de l'évaporation. Dans les simulations du modèle MED8, réalisées avec les scénarios LMDZ, le débit des fleuves n'est pas pris en compte pour l'instant.

4.5 Sensibilité de la circulation thermohaline au réchauffement global

Pour un réchauffement global anthropique, le bassin Méditerranéen connaît simultanément une augmentation de la température de surface et une augmentation du déficit en eau (donc de la salinité). Ces deux facteurs exercent des effets contradictoires pour la circulation thermohaline de la Méditerranée. Peu d'études sur ce sujet sont trouvables dans la littérature scientifique, mais on pourrait raisonnablement spéculer que l'effet de la température l'emporte sur l'effet de la salinité, et que la circulation thermohaline de la Méditerranée est ralentie. Ceci pourrait également entraîner une diminution de l'apport des nutriments pour l'écosystème marin.

Cette thématique constitue la partie centrale du projet GICC-MedWater. Elle est étudiée à Météo-France et à l'IPSL, avec un même modèle océanique MED8, mais différents forçages atmosphériques du réchauffement anthropique.

A Météo-France, le forçage du modèle Arpège est utilisé: tension du vent, flux de chaleur, flux d'eau douce, débit des fleuves et SST. Pour l'ensemble de la Méditerranée et pour la période de la fin du 21^e siècle, la perte du flux de chaleur est de 1,8 W/m² (contre 6,2 W/m² pour le climat actuel). Ceci implique un gain de l'énergie de la Méditerranée (ou une perte moins importante de chaleur). Le déficit en eau (évaporation - précipitation - débit des rivières) est de 0,94 m/an (contre 0,72 m/an dans le climat actuel). Ceci implique une augmentation de la salinité de surface. L'augmentation de la SST (+2,5°C) est presque homogène pour l'ensemble de la Méditerranée, mais l'augmentation de la salinité de surface est assez hétérogène, de +0,28 PSU dans le Golfe du Lion à +0,70 PSU dans la Mer Egée.

Dans la simulation forcée par ARPEGE, la zone tampon simulant l'océan atlantique par un rappel voit également ses caractéristiques T et S évoluer au cours du scénario. Cette évolution est calculée à partir des données de l'océan de la simulation couplé CNRM. Pour comparaison avec le scénario, une simulation jumelle de contrôle a également été réalisée. Elle a la même durée que le scénario (1960-2099) mais les forçages utilisés sont ceux de la période 1960-1980, répétés 7 fois de suite. Cette simulation de contrôle a permis de s'assurer de la stabilité du modèle pour de très longues simulations et de mesurer l'impact du réchauffement climatique comme la différence entre les 30 dernières années des deux simulations.

Parallèlement aux études menées à Météo-France, l'IPSL utilise aussi le même modèle MED8 pour évaluer les conséquences du réchauffement global sur la circulation générale de la Mer Méditerranée. Les trois scénarios régionalisés, IPSL, CNRM et GFDL, décrits en section 4.1, ont été successivement utilisés dans le modèle MED8. La mise en place technique des simulations est légèrement différente de celle adoptée à Météo-France. En effet, l'IPSL utilise l'approche basée sur les "anomalies" des forçages, tandis que Météo-France utilise directement les forçages atmosphériques du climat actuel et du climat futur.

L'approche "anomalies" consiste à simuler l'état actuel (contrôle) de la Méditerranée en utilisant le forçage observé (en l'occurrence, celui de l'analyse opérationnelle ECMWF), et à simuler l'état futur en superposant les anomalies du forçage sur le forçage observé. Cette approche permet d'avoir un état actuel simulé plus proche de la réalité, et d'avoir une référence commune pour effectuer les comparaisons entre plusieurs scénarios.

Les Figures 13, 14 et 15 montrent les trois quantités les plus importantes pour forcer la Méditerranée: le bilan net de chaleur, le déficit d'eau et la tension du vent. La disposition de ces trois graphiques est identique, c'est-à-dire, le champ de la simulation de contrôle est montré en haut à gauche, et les trois autres plages correspondent aux anomalies des trois scénarios (IPSL, CNRM et GFDL).

Pour le flux de chaleur, la Méditerranée gagne de l'énergie pour l'ensemble du domaine, sauf une légère perte près de la côte franco-espagnole dans le scénario IPSL. Pour le déficit en eau, l'augmentation est généralisée pour les scénarios IPSL et CNRM. Mais elle est faible dans le scénario GFDL où on peut aussi observer des zones de diminution. Pour la tension du vent, les trois scénarios sont aussi très cohérents avec une structure anticyclonique pour la Méditerranée. Il est intéressant de voir que cette anomalie s'oppose en général au flux moyen sauf sur la mer Egée. Cela signifie que l'intensité du forçage par le vent diminue pour la majeure partie de la Méditerranée. Ce résultat est également obtenu avec la simulation ARPEGE-Méditerranée ainsi que plusieurs modèles du projet européen PRUDENCE.

Avec les trois scénarios et le climat actuel, MED8 a été donc tourné 4 fois 50 ans. Les diagnostics sont montrés dans le Tableau 3 concernant la température et la salinité de la Méditerranée, qui sont augmentées dans les trois scénarios (0,3 à 0,5°C pour la température et 0,02 psu pour la salinité), surtout pour la couche superficielle de la Méditerranée. Avec les résultats d'Arpège, MED8 a été aussi tourné en mode transitoire pour le climat de contrôle et le climat de scénario. Le Tableau 3 montre aussi les températures et salinités dans la simulation de contrôle et le scénario pour la fin du 21e siècle. Comme dans les scénarios LMDZ, une augmentation générale de température et de salinité est constatée.

Les résultats sur la formation de masses d'eau profonde confirment notre spéculation de départ: un affaiblissement général de la circulation thermohaline est obtenu pour le réchauffement global anthropique. Prenons l'exemple du scénario Arpège/CNRM dans lequel un diagnostic supplémentaire a été effectué pour la circulation thermohaline, son affaiblissement est estimé à 60% pour la formation des masses d'eau profonde (Eaux profondes du bassin ouest et du bassin est), et à 20% pour la masse d'eau intermédiaire du bassin Levantin.

L'intensité de la circulation thermohaline de retournement de la Méditerranée peut être assez clairement montrée sur un diagramme ZOF (Mediterranean Zonal Overturning Stream Function). La Figure 16 montre respectivement la ZOF de l'expérience de contrôle (en haut) et de l'expérience du scénario de la fin du 21e siècle (en bas). Les valeurs sont des moyennes sur les 30 dernières années de simulations. La circulation intermédiaire est visible par deux centres positifs (1,2 Sv dans le bassin est et 1,5 Sv dans le bassin ouest). Ils représentent principalement la circulation de l'Eau atlantique modifiée (MAW) et de l'Eau levantine intermédiaire (LIW). Le centre négatif au fond et dans le bassin Est montre la circulation de la masse d'eau profonde de la Méditerranée Est (environ 0,5 Sv, EMDW). En revanche, la circulation de la masse d'eau profonde de la Méditerranée Ouest (WMDW) n'est pas visible dans ce diagramme ZOF, puisqu'elle est principalement méridienne. La comparaison entre le climat actuel et le climat de la fin du siècle montre une diminution des cellules intermédiaires en intensité et en profondeur. La cellule profonde disparaît presque entièrement. Par ailleurs, en traçant la fonction de retournement méridienne dans le bassin ouest (non montrée), on s'aperçoit également que la circulation thermohaline profonde du bassin ouest s'affaiblit fortement. Une diminution de 60% est mesurée entre la simulation de

contrôle et la fin du scénario (moyenne sur 2070-2099). On peut donc conclure que la circulation thermohaline de la Méditerranée est ralentie et moins profonde sous l'effet du réchauffement global.

La profondeur de la couche de mélange océanique est aussi un bon indicateur pour la formation de masses d'eau profonde. Figure 17 montre la profondeur de la couche de mélange dans le Golfe du Lion. On peut constater que la formation d'eau profonde est presque entièrement arrêtée sous l'effet du réchauffement global. Ceci peut avoir des conséquences importantes sur la circulation et l'écosystème de la Méditerranée.

Le Détroit de Gibraltar donne une indication intégrale du changement dans la Méditerranée. Le Tableau 4 montre les différentes quantités (le transport, la température et la salinité) au Détroit de Gibraltar. On peut voir que le transport de masse est diminué lorsque le climat se réchauffe. Cette diminution est d'autant plus importante que le réchauffement est plus fort, dans l'ordre croissant des scénarios IPSL, CNRM et GFDL. Les propriétés de l'eau atlantique entrante ne changent pas beaucoup dans les scénarios LMDZ, car la zone de tampon atlantique reste inchangée dans les simulations de scénarios. Pour l'eau sortante en profondeur, la température et la salinité sont toutes les deux augmentées. Pour le scénario Arpège/CNRM, une eau sortante plus salée (+0,5 PSU) et plus chaude (+2.0°C) est simulée pour la fin du 21e siècle (voir aussi le tableau 5). Les études récentes basées sur des observations révèlent aussi une tendance chaude et salée pour les masses d'eau profonde de la Méditerranée, ce qui est peut-être la manifestation du réchauffement global anthropique en marche (Bethoux et al. 1990, Nature; Potter and Lozier 2004, GRL; Rixen et al. 2005, GRL).

Il est utile de noter que les différences constatées au Tableau 4 entre LMDZ et Arpège sont partiellement liées aux deux approches différentes pour mener les simulations. Notamment, avec les scénarios LMDZ, la salinité de surface ne change pas, car il y a un terme de rappel qui est utilisé pour restaurer la salinité de surface à sa valeur observée du climat présent.

5. Base de données et site Internet.

Pour assurer le bon fonctionnement du projet et une bonne diffusion des résultats de la recherche vers les utilisateurs identifiés et potentiels, il est important de mettre en place une base de données distribuée avec une interface Web. L'architecture de cette base de données a été développée au GIP Médias-France. Les données disponibles sont maintenant répertoriées et elles seront publiques dans quelques temps, nécessaire pour la publication des résultats.

Un site Web a été réalisé qui sert de vitrine et de site focal pour l'ensemble des communautés intéressées par notre projet, et en particulier les utilisateurs potentiels des produits de notre recherche. Il est actuellement au LMD (http://www.lmd.jussieu.fr/~li/gicc_medwater/index.html) et sur le serveur de Médias-France.

6. Publications en relation avec le projet

- Li, L., 2003: Evolution future du climat en Méditerranée: vers un état de sécheresse accru?, Rapport quadriennal du CNFGG 2003. pages 220-223.

- Li, Z.X., S. Conil, 2003: Transient response of an atmospheric GCM to North Atlantic SST anomalies, J. Climate, 16, 3993-3998.

- Déqué, M., F. Sevault, S. Somot, 2003: Impact of an IPCC-B2 scenario on Mediterranean sea temperature. Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC Working group on numerical experimentation. Report No.33. April 2003. WMO/TD-No.1161.
 - Sevault, F., M. Déqué, S. Somot, 2003: Scénario d'évolution de la mer Méditerranée pour le XXIème siècle: le modèle OPA-Méditerranée forcé par ARPEGE-Climat. Note Interne du CNRM, n.87
 - Somot S., F. Sevault, M. Déqué (2003) Scénario d'évolution de la mer Méditerranée pour le XXIème siècle. Proceedings des Atelier Modélisation Atmosphérique, 141-144, CNRM Ed., Toulouse, décembre 2003.
 - Déqué, M., F. Sevault, S. Somot, 2004: Mediterranean convection and climate change. Research activities in atmospheric and oceanic modelling. CAS/JSC Working group on numerical experimentation. Report No.34. April 2004. WMO/TD-No.1220.
 - Sevault, F., S. Somot, M. Déqué, 2005: Climate change scenario for the Mediterranean Sea. Proceedings of the Oceanops04 conference.
 - Sevault F., S. Somot (2005) Le modèle OPA-Méditerranée forcé par les flux et la température de surface de la réanalyse ERA40 du CEP. Note de centre n°94. Groupe de Météorologie de Grande Echelle et Climat. CNRM. janvier 2005
 - Somot, S., F. Sevault, 2005: Climate change impact on the Mediterranean Sea circulation: a regional modelling approach. Note de centre n°95. Groupe de Météorologie de Grande Echelle et Climat. CNRM. février 2005.
 - Jost, A., D. Lunt, M. Kageyama, A. Abe-Ouchi, O. Peyron, P.J. Valdes, G. Ramstein, 2005: High-resolution simulations of the last glacial maximum climate over Europe: a solution to discrepancies with continental paleoclimatic reconstructions ? Climate Dynamics, 24, 577-590.
- Kageyama M., N. Combourieu Nebout, P. Sepulchre, O. Peyron, G. Krinner, G. Ramstein, J.-P. Cazet, 2005. Le Dernier Maximum Glaciaire et l'événement de Heinrich 1 en termes de climat et de végétation autour de la Mer d'Alboran : une comparaison préliminaire entre modèles et données. *Compte Rendus Geoscience*, 337, 983-992.
- Somot, S., 2005: Modélisation climatique du bassin méditerranéen: variabilité et scénarios de changement climatique. Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, soutenance le 13 décembre 2005.
 - Bozec, A., 2006: La circulation thermohaline de la mer Méditerranée sous des climats présent et futur. Thèse de doctorat, Université de Paris VI, soutenance le 27 janvier 2006.
 - Sevault F., S. Somot, M. Déqué (2006) Vers un scénario couplé régional de la Méditerranée au 21ème siècle. Proceedings des Atelier Modélisation Atmosphérique, CNRM Ed., Toulouse, janvier 2006.
 - Lionello, P., P. Malanotte-Rizzoli, R. Boscolo, P. Alpert, V. Artale, L. Li, J. Luterbacher, W. May, R. Trigo, M. Tsimplis, U. Ulbrich and E. Xoplaki, 2006: The Mediterranean Climate: An

Overview of the Main Characteristics and Issues. Introduction of the book "Mediterranean climate variability and predictability" edited by P. Lionello, Elsevier, pages 1-26.

- Li, L., A. Bozec, S. Somot, K. Béranger, P. Bouruet-Aubertot, F. Sevault, M. Crépon, 2006: Regional atmospheric, marine processes and climate modelling. Chapter 7 in the book "Mediterranean climate variability and predictability" edited by P. Lionello, Elsevier, pages 373-397.

- Ulbrich, U., W. May, L. Li, P. Lionello and J. G. Pinto, S. Somot, 2006: The Mediterranean Climate Change Under Global Warming. Chapter 8 in the book "Mediterranean climate variability and predictability" edited by P. Lionello, Elsevier, pages 399-415.

- Li, L., A. Bozec, S. Somot, 2006: Modelling regional-scale climate change of the Mediterranean. Exchanges, Newsletter of CLIVAR, No 37 (volume 11 No 2); April 2006, pages 24-27.

- Li, Z.X., 2006: Atmospheric GCM response to an idealized anomaly of the Mediterranean sea surface temperature. Climate Dynamics (in press).

- Somot, S., F. Sevault, M. Déqué, 2006: Transient Climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the 21st century using a high-resolution ocean circulation ocean. Submitted to Climate Dynamics (in revision).

- Goubanova, K., L. Li, 2006: Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. Submitted to Planetary and global changes (in revision).

7. Quelques événements en relation avec le GICC-MedWater

1) En été 2003, avec le projet GICC-MedWater comme modèle, un projet intégré (IP) EU-MedWater a été élaboré dans le cadre du 2e appel d'offres du 6e PCRD européen. Laurent Li était le coordinateur scientifique de l'IP pendant son élaboration. Le projet a rassemblé plus de 40 équipes partenaires en Europe et autour de la Méditerranée. Ce projet n'a pas été retenu par la Commission européenne pour financement, mais il a sans doute largement contribué à l'incorporation explicite du thème "Méditerranée" dans le 4e appel d'offres du 6e PCRD.

2) GICC-MedWater a contribué au projet MedCLIVAR proposé par Paula Malanotte-Rizzoli (MIT, Etats-unis) et Piero Lionello (Université de Lecce, Italie), depuis avril 2003. MedCLIVAR est maintenant une partie officielle du programme international CLIVAR. Laurent Li et Serge Planton font partie du Comité scientifique de pilotage (SSG: Scientific steering group) du MedCLIVAR. Plusieurs actions ont été engagées dans le cadre du projet MedCLIVAR: Réalisation et publication (chez Elsevier) d'un livre blanc sur le climat en Méditerranée; Tenu d'un atelier de travail à Rome en mai 2004 qui était soutenu par ESF (European Science Foundation); Elaboration et acceptation d'un projet de recherche ESF (Mediterranean climate variability and predictability) pour une période de 5 ans (2006-2011).

3) GICC-MedWater a contribué fortement à l'élaboration du projet CIRCE (Climate change impacts for the Mediterranean), coordonné par Antonio Navarra de l'INGV en Italie. En ayant passé la 1e phase de sélection, CIRCE est actuellement en 2e phase de sélection à la Commission européenne.

4) Deux thèses de doctorat (Samuel Somot à Météo-France et Alexandra Bozec à l'IPSL) ont été préparées dans le cadre scientifique du projet GICC-MedWater. Elles ont été soutenues avec succès en décembre 2005 et janvier 2006 respectivement.

8. Conclusion et perspectives

Le projet GICC-MedWater est focalisé sur le cycle de l'eau dans le bassin méditerranéen. Il utilise une série d'outils qui ont été récemment développés et qui serviront à modéliser les différentes composantes du système climatique régional du bassin méditerranéen et de sa marge nord: Modèles couplés du système climatique global, Modèles climatiques régionaux, Modèle dynamique de la mer Méditerranée, Modèle sur l'écosystème de la Méditerranée. Quatre études scientifiques ont été proposées au départ du projet et elles ont été accomplies durant les trois années du projet: (1) réalisation des scénarios régionaux du climat, (2) validation des modèles et diagnostic du climat régional, (3) circulation générale de la mer Méditerranée, et (4) écosystème de la Méditerranée.

Les résultats scientifiques significatifs ont été obtenus dans le projet dont une majorité a été valorisée par les publications scientifiques. Le projet GICC-MedWater a contribué aussi très fortement à la coordination de la communauté nationale sur la modélisation du climat en Méditerranée. Le projet GICC-MedWater a contribué à l'émergence de la thématique générale de la Méditerranée en France et en Europe.

Finalement, certaines limitations de notre démarche qui consiste à utiliser séquentiellement et individuellement les différents modèles ont été aussi mises en évidence durant le déroulement du projet. La solution serait de poursuivre les expériences du GICC-MedWater en utilisant des modèles couplés du système climatique méditerranéen. De tels modèles (ROACM: Regional Ocean-Atmosphere Coupled Model) étant en cours de construction et de validation à Météo-France et à l'IPSL, une deuxième phase du projet MedWater pourrait être proposée dans le futur.

Tableaux (4):

Simulation	Période	Conditions aux limites	durée
LMDZ/CTRL	1970/1999	SST et glace de mer observées	45 ans
Arpège/CTRL	1970/1999	Issues du modèle global de contrôle	3x30 ans
LMDZ/IPSL	2070/2099	Emission SRES-A2, Climat global IPSL	45 ans
LMDZ/CNRM	2070/2099	Emission SRES-A2, Climat global CNRM	45 ans
LMDZ/GFDL	2070/2099	Emission SRES-A2, Climat global GFDL	45 ans
Arpège/CNRM	2070/2099	Emission SRES-A2, Climat global CNRM	3x30 ans

Tableau 1: Récapitulation des simulations de régionalisation réalisées avec le modèle LMDZ-Méditerranée et le modèle Arpège-Méditerranée.

	LMDZ/IPSL	LMDZ/CNRM	LMDZ/GFDL	Arpège/CNRM
E (mm/an)	39	57	-7	120
P (mm/an)	-57	-74	-20	-60
E-P (mm/an)	96	131	13	180
Bilan chaleur(W/m2)	3,6	5,8	11,9	4,9

Tableau 2: Variations de l'évaporation, de la précipitation, du déficit en eau, et du flux de chaleur pour l'ensemble de la Méditerranée et en moyenne annuelle pour les quatre scénarios.

	température (°C)			salinité (PSU)		
	total	0/250m	250m/fond	total	0/250m	250m/fond
LMDZ/CTRL	13,91	15,33	13,79	38,59	38,43	38,66
Arpège/CTRL	13,2	14,2	13,1	38,61	38,27	38,66
LMDZ/IPSL	0,31	1,25	0,15	0,02	0,08	0,00
LMDZ/CNRM	0,43	1,81	0,20	0,02	0,09	0,00
LMDZ/GFDL	0,49	2,13	0,22	0,02	0,07	0,00
Arpège/CNRM	1,0	2,0	0,8	0,18	0,31	0,16

Tableau 3: Température (°C) et salinité (PSU) dans les simulations de contrôle LMDZ/CTRL et Arpège/CTRL, et leurs variations dans les quatre simulations de scénario (LMDZ/IPSL, LMDZ/CNRM, LMDZ/GFDL et Arpège/CNRM).

	eau entrante à la surface			eau sortante en profondeur		
	transport	tempér.	salinité	transport	tempér.	salinité
LMDZ/CTRL	0,656	16,44	36,45	0,656	13,53	38,256
Arpège/CTRL	1,18	15,69	36,35	1,18	12,43	38,28
LMDZ/IPSL	-0.070	0.02	0.00	-0.070	1.15	0.15
LMDZ/CNRM	-0.013	0.16	0.00	-0.013	1.57	0.13
LMDZ/GFDL	-0.150	0.25	0.00	-0.150	1.84	0.09
Arpège/CNRM	-0.09	1.40	0.19	-0.09	2.01	0.44

Tableau 4: Transport (Sv), température (°C) et salinité (psu) au Déroit de Gibraltar pour les simulations de contrôle LMDZ/CTRL et Arpège/CTRL, et leurs variations dans les quatre simulations de scénario LMDZ/IPSL, LMDZ/CNRM, LMDZ/GFDL et Arpège/CNRM. Le courant de surface qui entre dans la Méditerranée et celui au fond qui sort du déroit sont séparément listés.

Figures (17):

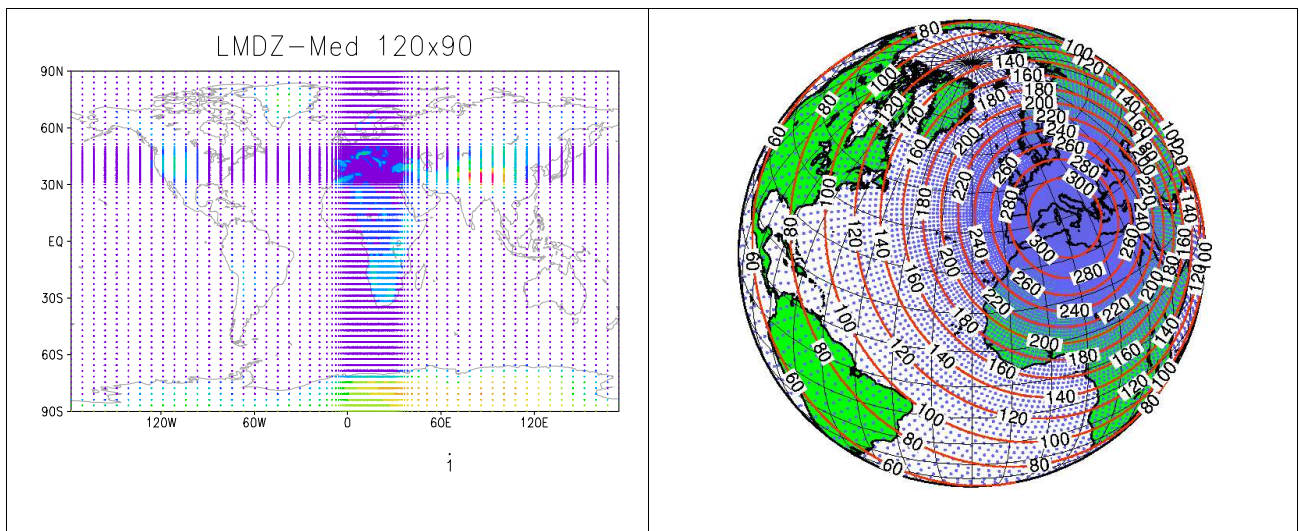


Figure 1: Mailles variables des deux modèles atmosphériques utilisés pour régionaliser les scénarios climatiques: LMDZ-Méd à gauche et Arpège-Méd à droite.

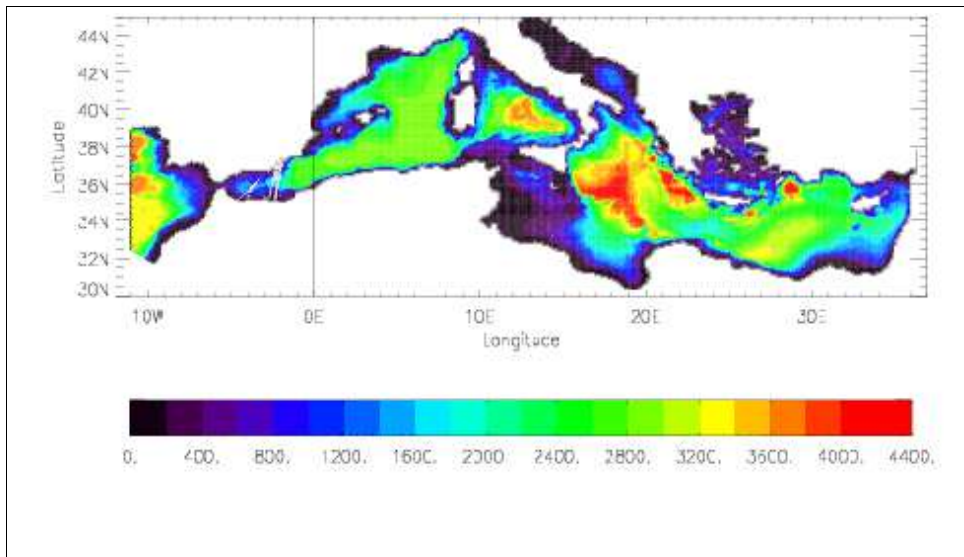


Figure 2: La bathymétrie (mètres) du modèle MED8

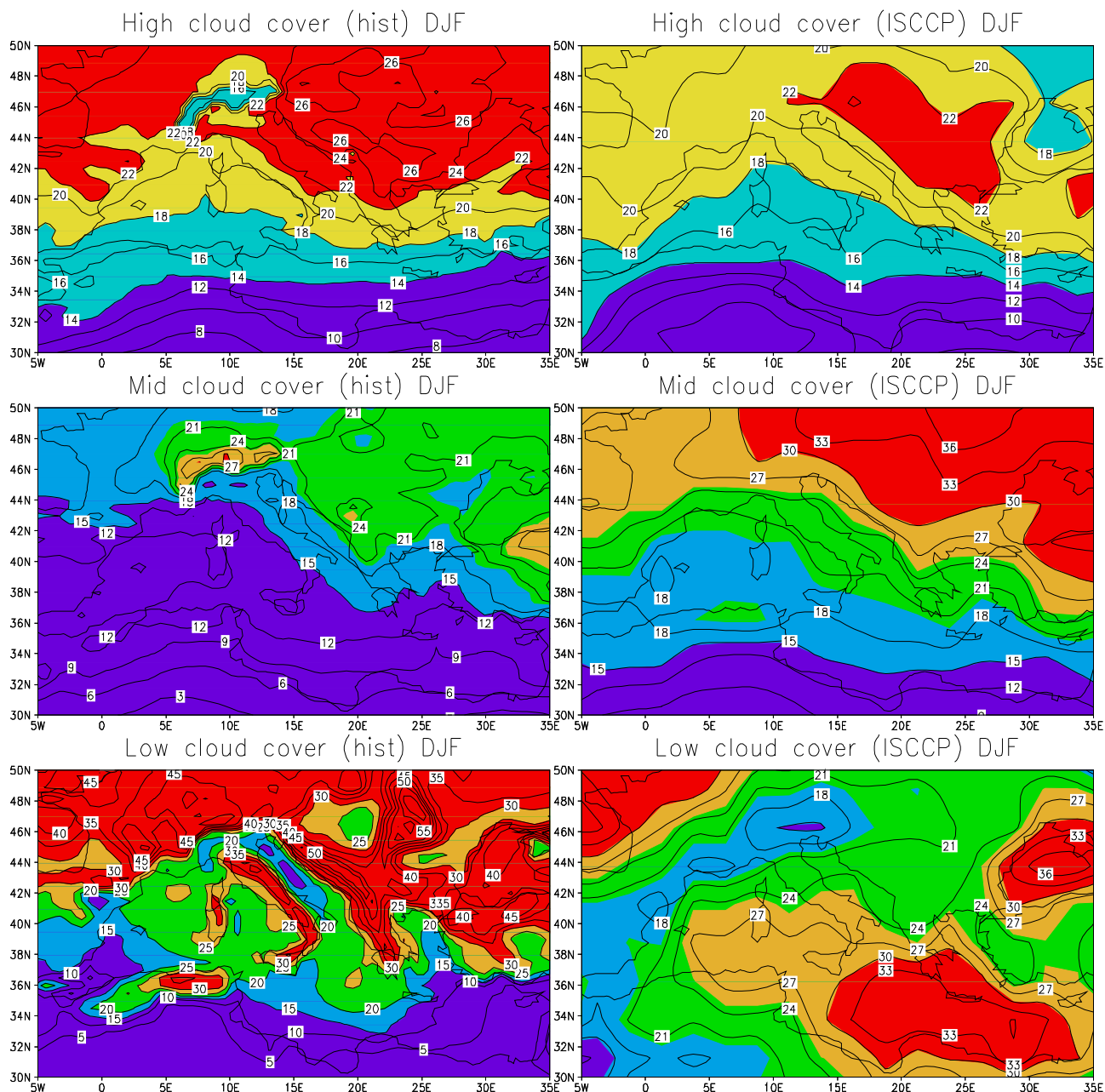


Figure 3: Nébulosités hautes, moyennes et basses de décembre-janvier-février pour le modèle LMDZ (10 ans: 1991-2000) et la climatologie ISCCP (21 ans: 1984-2004). Note: ISCCP (International Satellite Cloud Climatology Project) est mis en place en 1982 comme une composante du WCRP (World Climate Research Programme), pour collecter et analyser les mesures satellitaires de radiance afin de déduire la distribution globale des nuages, de leurs propriétés et de leurs variations aux échelles diurne, saisonnière et interannuelle. La collection des données a commencé en juillet 1983, et est actuellement programmée pour continuer jusqu'en 2010.

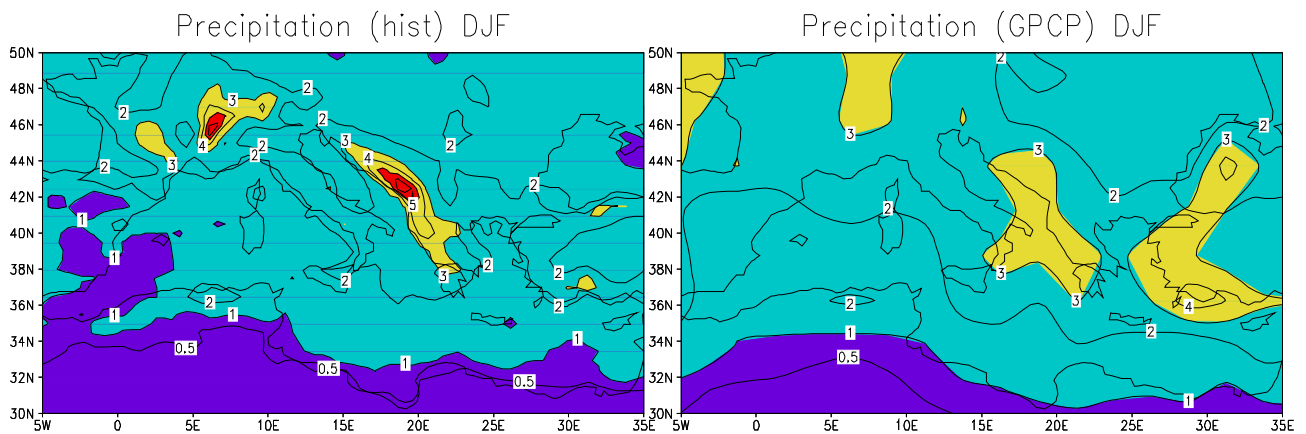


Figure 4: Précipitation totale (mm/jour) de DJF (décembre-janvier-février) pour le modèle LMDZ (10 ans: 1991-2000) et la climatologie de GPCP (26 ans: 1979-2004). Note: GPCP (Global Precipitation Climatology Project) est une composante du GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment), WCRP (World Climate Research Program). Le GPCP a été mis en place en 1986 avec l'objectif initial de fournir des précipitations globales en moyenne mensuelle et sur la grille de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ latitude-longitude. L'estimation des précipitations mensuelles commence en 1979. GPCP utilise les données spatiales (infrarouge et micro-onde) et les mesures in-situ de plus de 6000 stations. Les données infrarouge sont obtenues des satellites géostationnaires GOES, GMS et METEOSAT, et des satellites d'orbite polaire de la NOAA. Les données micro-ondes sont issues des satellites DMSP qui utilisent le SSMI.

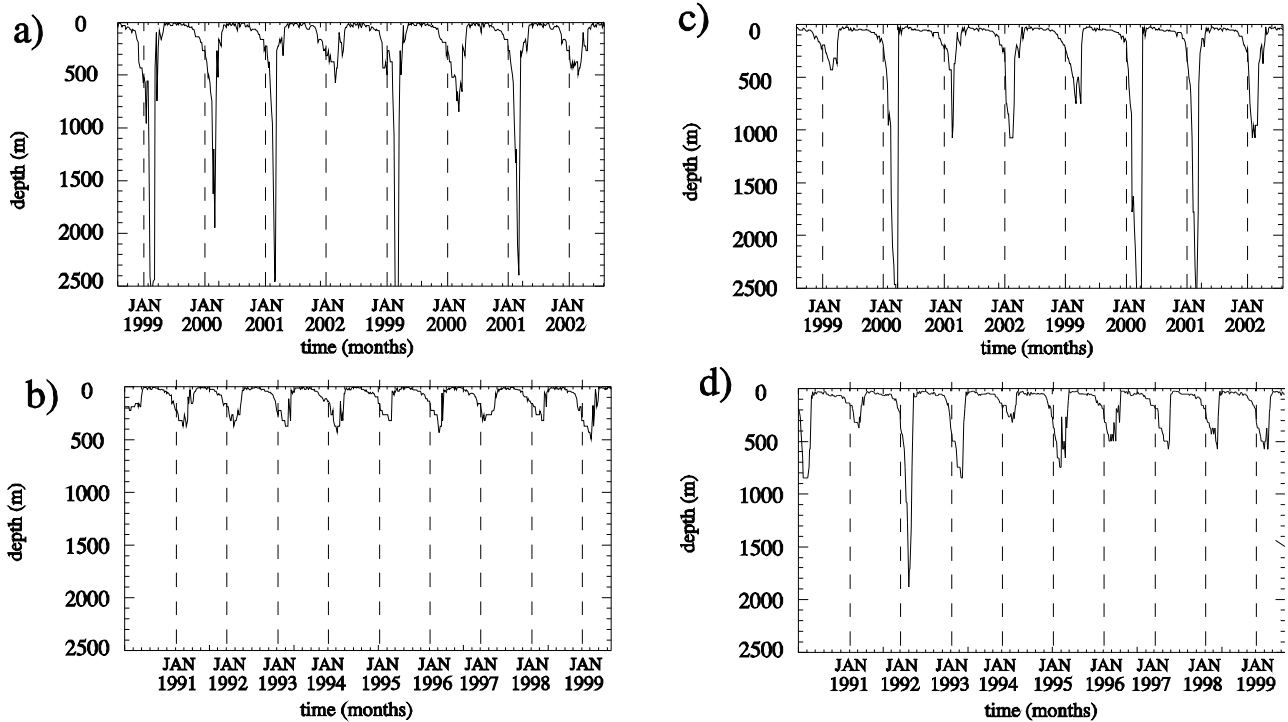


Figure 5: Evolution temporelle de la profondeur maximale de couche de mélange dans le Golfe du Lion (à gauche, a et b) et dans le bassin Levantin (à droite, c et d), résultat obtenu du modèle MED8 forcé respectivement par l'analyse opérationnelle ECMWF (en haut, a et c) et par la ré-analyse ERA40 (en bas, b et d).

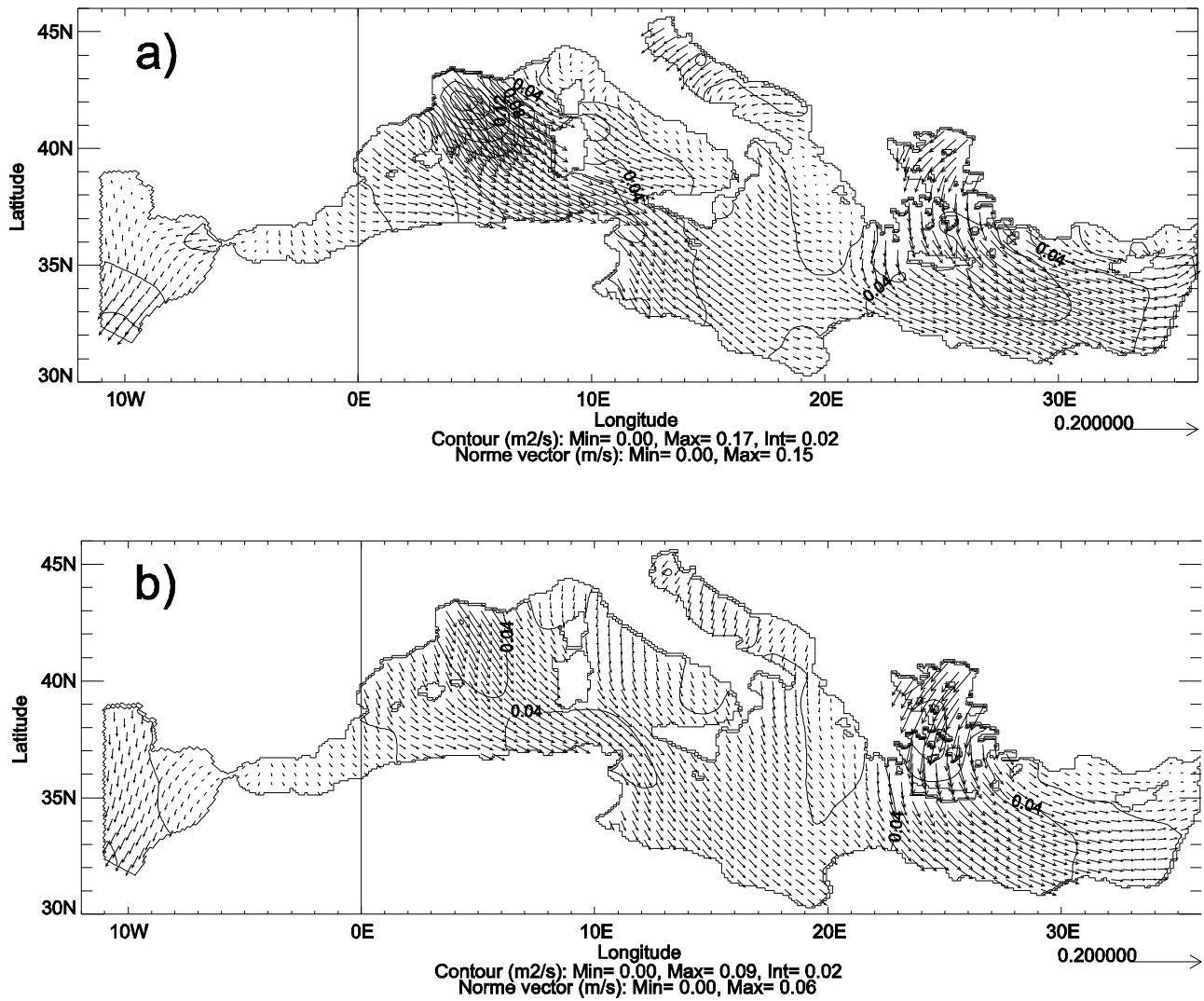


Figure 6: La tension du vent (Pa) pour la moyenne de janvier à mars. La plage en haut est issue de l'analyse opérationnelle ECMWF (1998-2002) et la plage en bas la ré-analyse ERA40 (1988-1999).

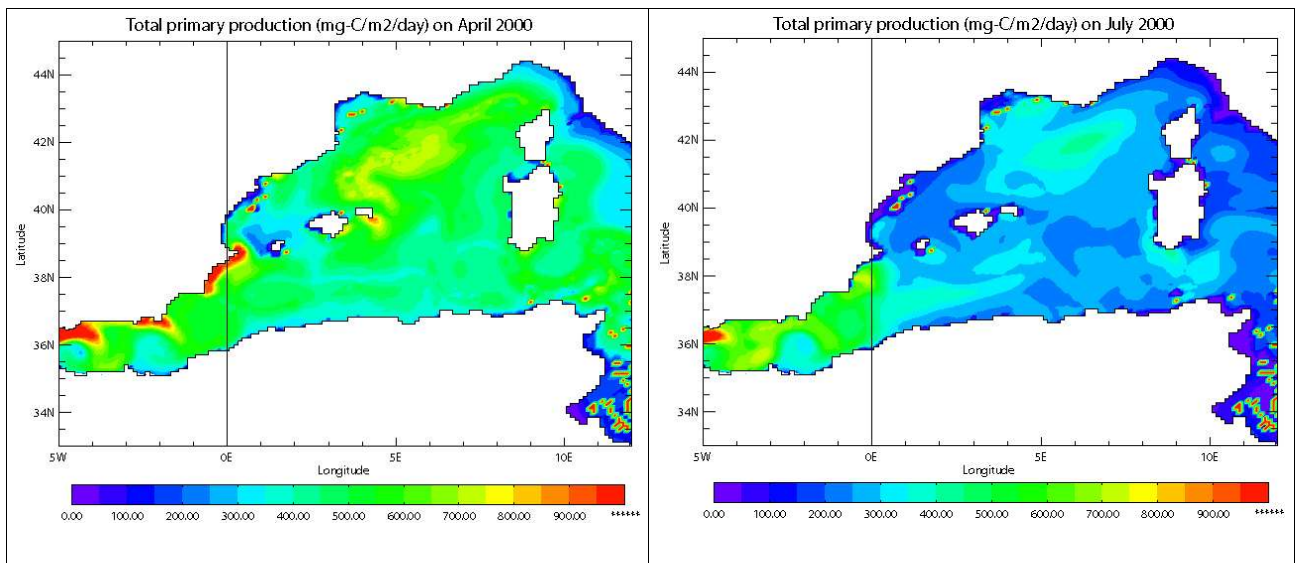


Figure 7: Production primaire simulée par le modèle MED8/PISCES pour avril et juillet 2000.

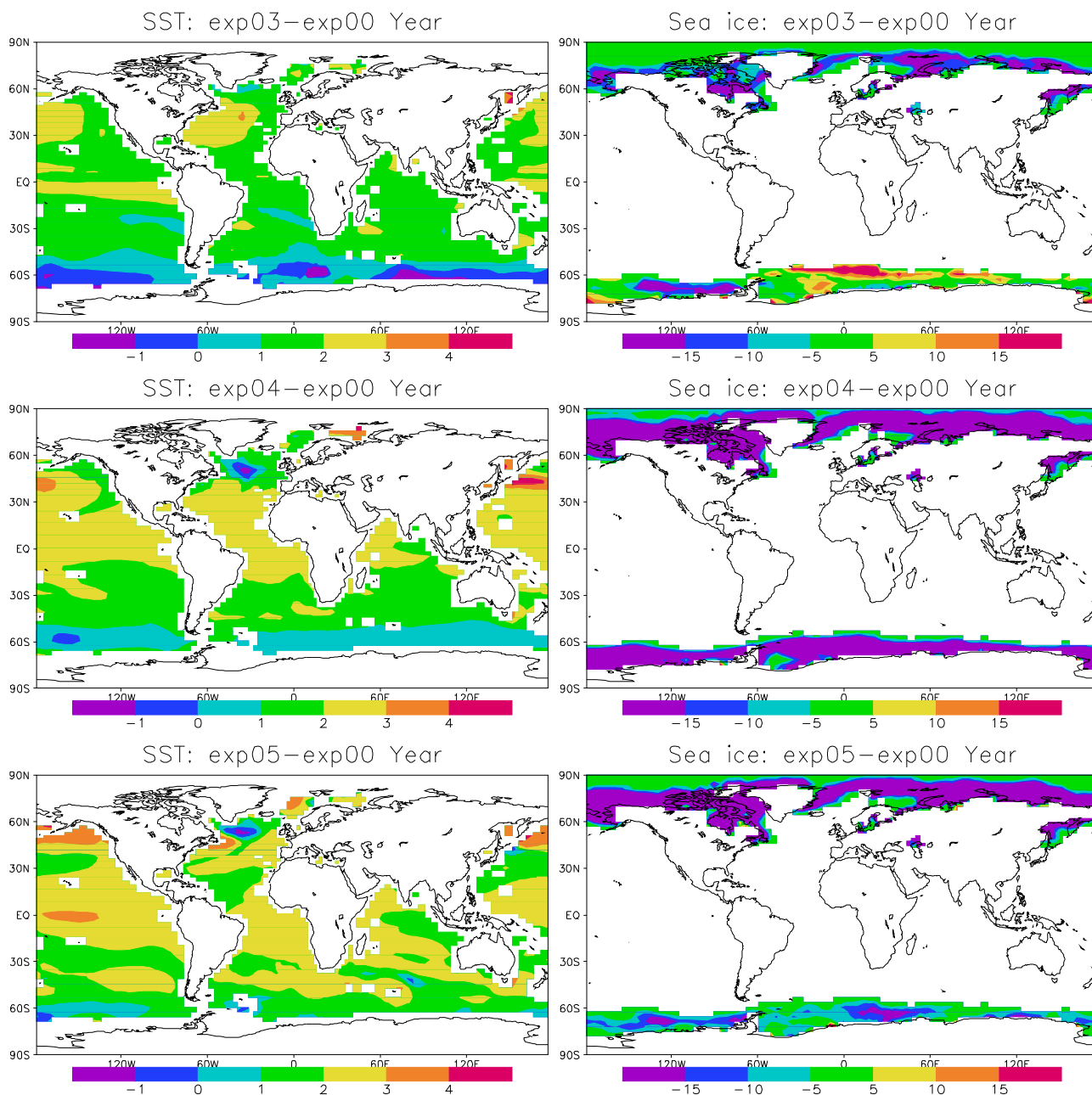


Figure 8: Conditions aux limites (SST à gauche et glace de mer à droite) exprimées en anomalie et en moyenne annuelle pour les trois scénarios globaux IPSL (en haut), CNRM (au milieu) et GFDL (en bas).

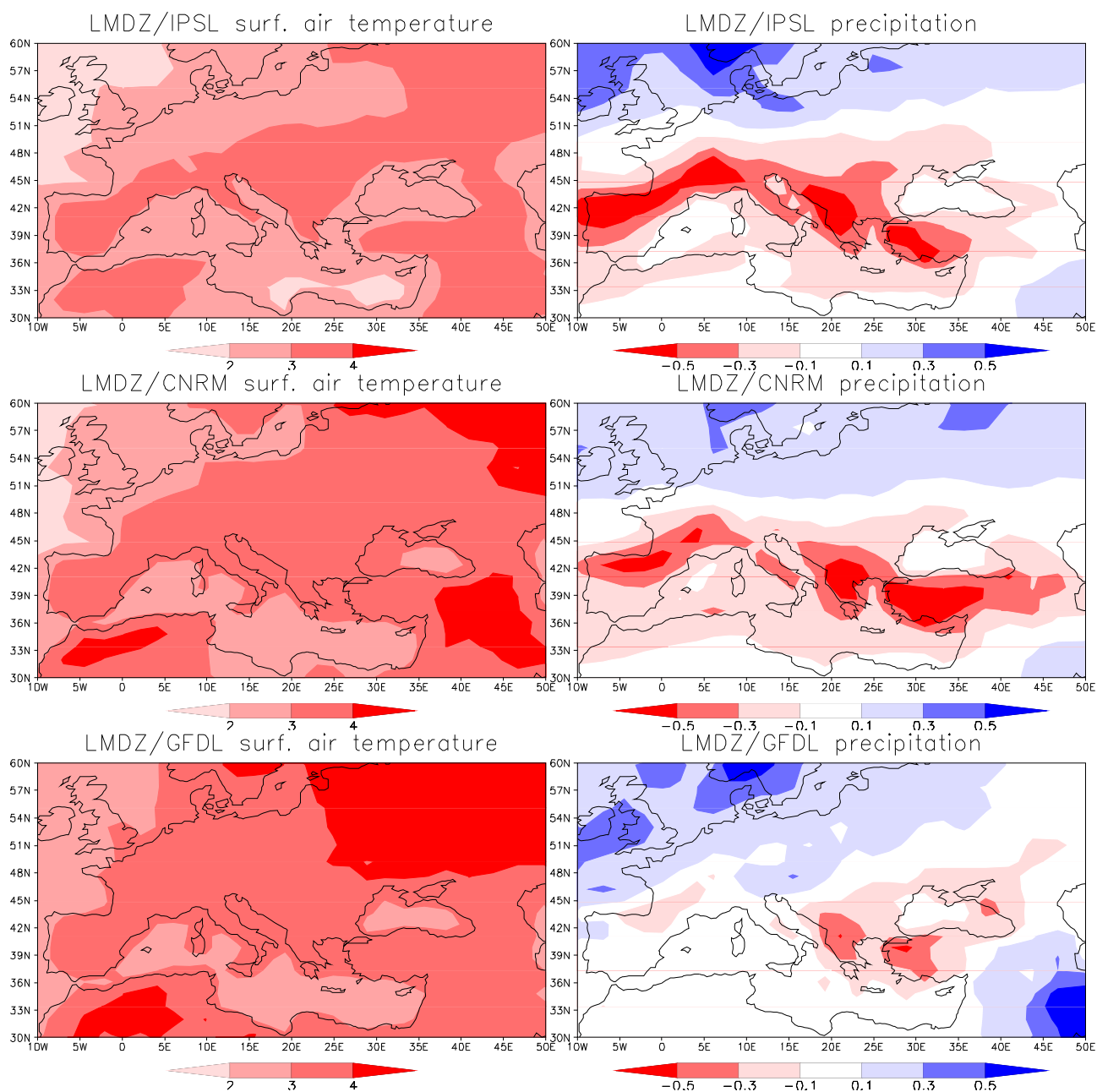


Figure 9: Anomalies en moyenne annuelle de la température à 2m (colonne de gauche) et des précipitations (colonne de droite) entre le climat de la fin du 21e siècle et le climat actuel. De haut en bas sont les trois scénarios LMDZ/IPSL, LMDZ/CNRM et LMDZ/GFDL

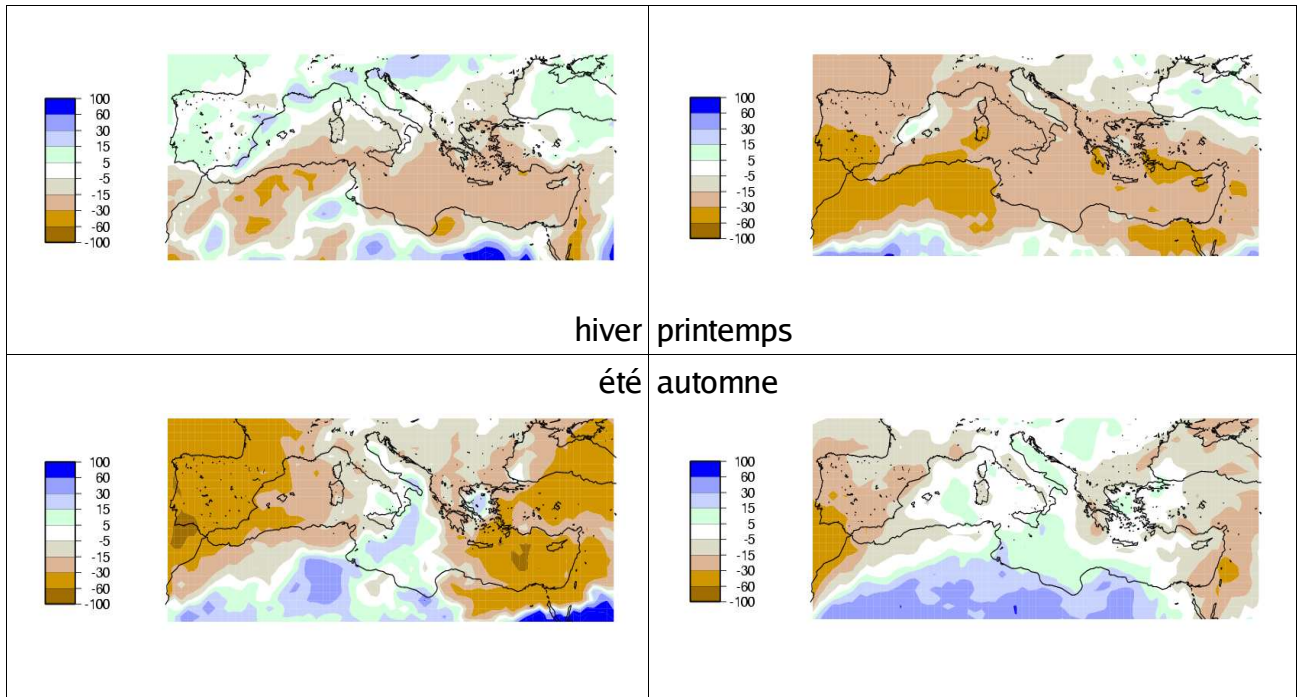


Figure 10: Anomalies relatives des précipitations, pour les quatre saisons, entre la fin du 21e siècle (Arpège/CNRM) et l'actuel (Arpège/CTRL).

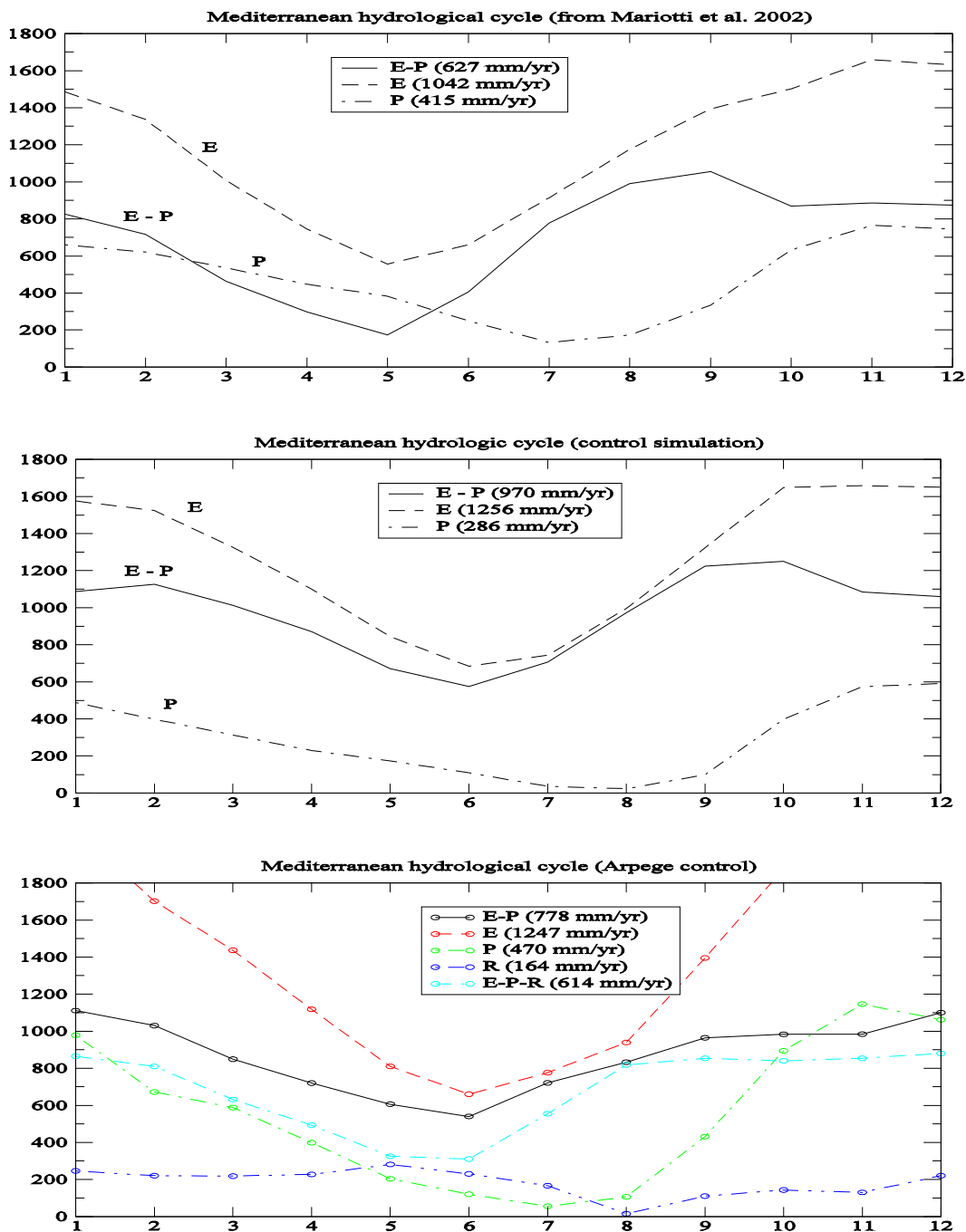


Figure 11: Cycles saisonniers de l'évaporation (E), de la précipitation (P) et du déficit d'eau (E-P), moyennés sur toute la Mer Méditerranée. Simulation Arpege en bas, LMDZ au milieu, estimation à partir de l'observation en haut (Mariotti et al. 2002, J. of Climate).

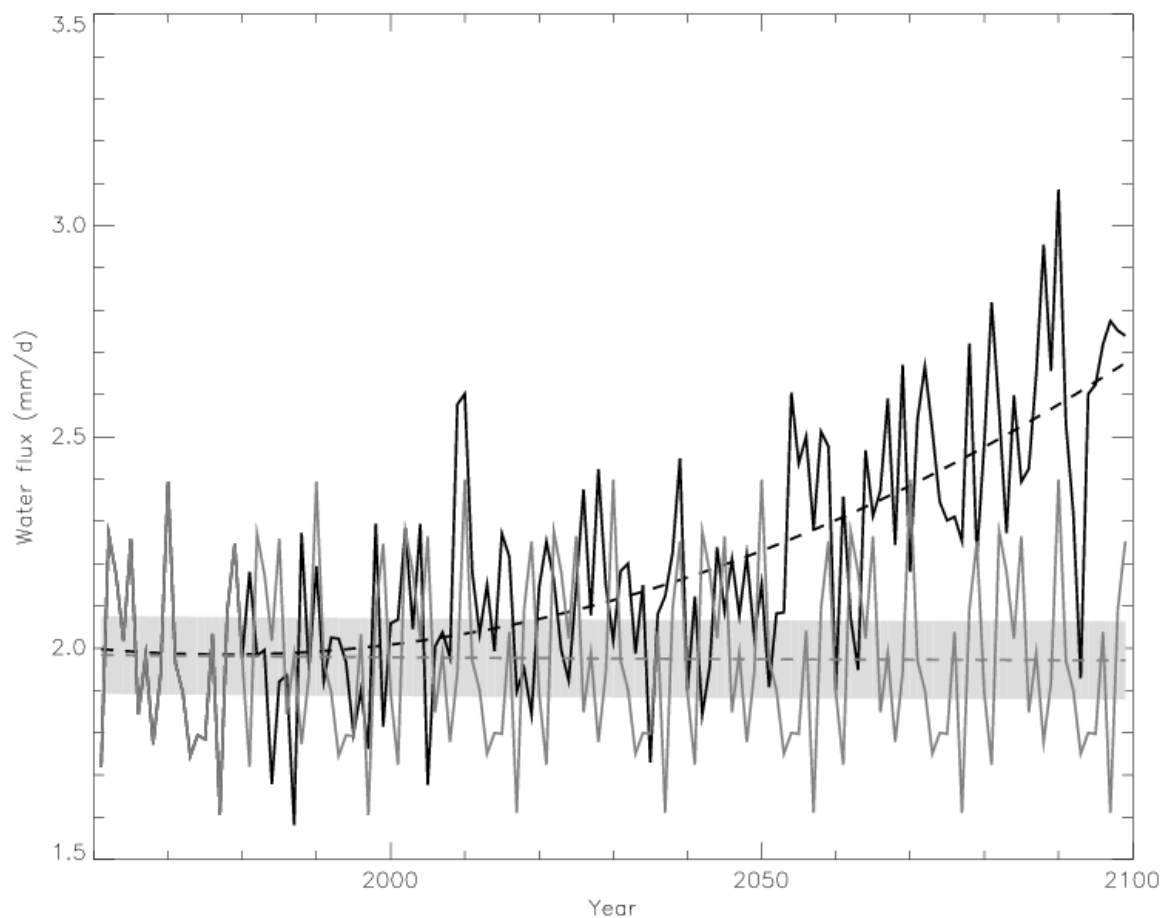
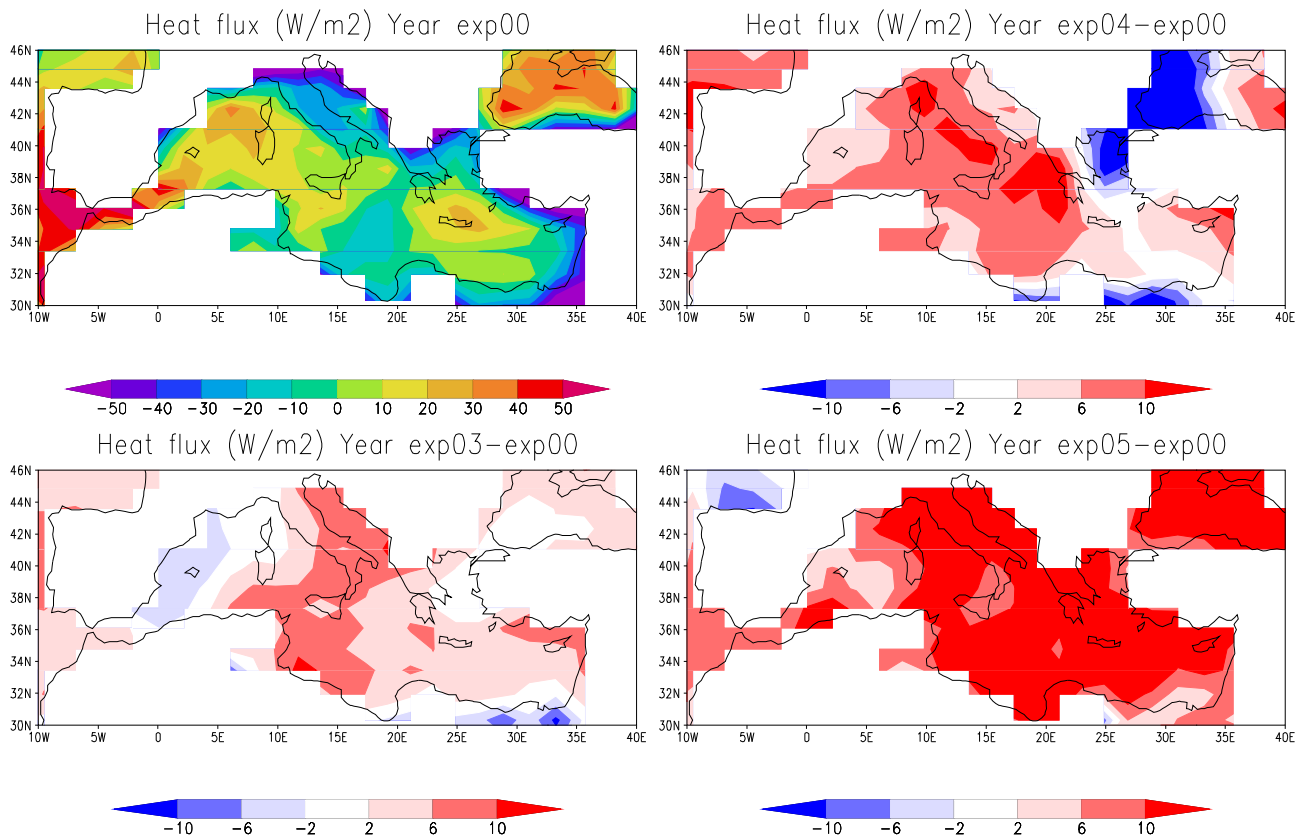
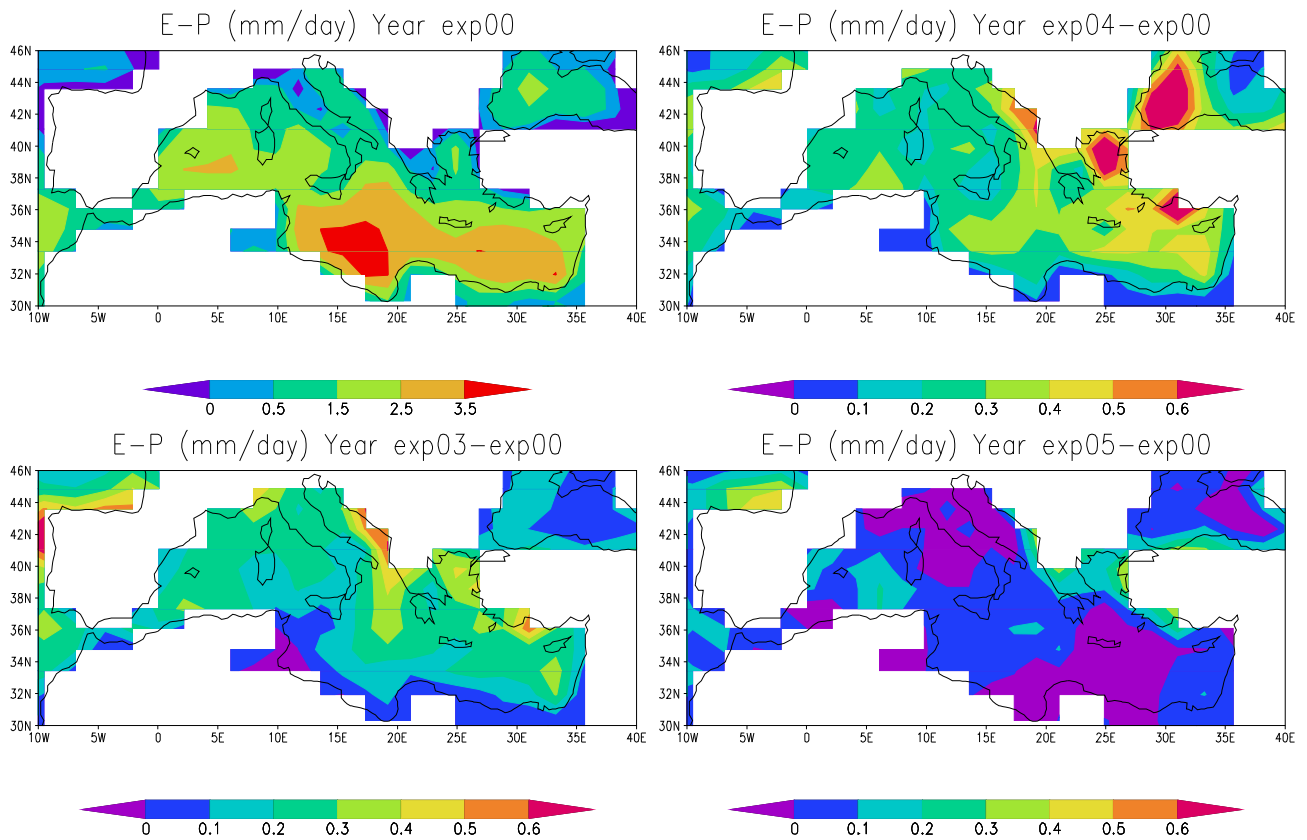


Figure12: Evolution du bilan d'eau (E-P-R) dans la simulation de contrôle (Arpège/CTRL, courbes grises) et la simulation du scénario (Arpège/CNRM, courbes noires). Les courbes en tiret sont des fits quadratiques par moindre carré des courbes en trait plein. Elles permettent de s'affranchir de la variabilité interannuelle en montrant les tendances. L'intervalle grisé représente un intervalle de confiance à 95% autour du fit de la courbe de la simulation de contrôle.



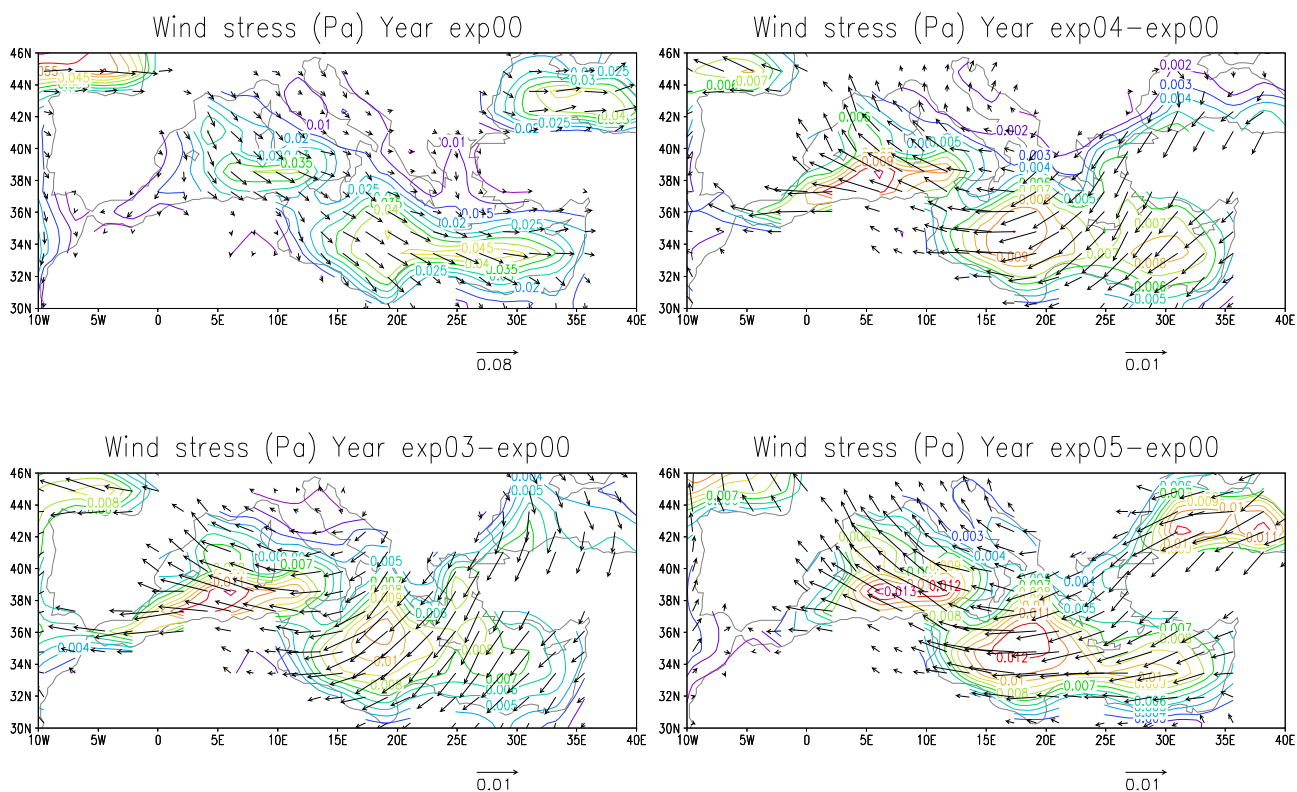
	Contrôle	Anomalies dans scénario CNRM
Anomalies dans scénario IPSL		Anomalies dans scénario GFDL

Figure 13: Flux net de chaleur dans la simulation de contrôle et ses anomalies dans les trois scénarios.



	Contrôle	Anomalies dans scénario CNRM
Anomalies dans scénario IPSL		Anomalies dans scénario GFDL

Figure 14: Déficit d'eau (E-P) dans la simulation de contrôle et ses anomalies dans les trois scénarios.



	Contrôle	Anomalies dans scénario IPSL
Anomalies dans scénario CNRM		Anomalies dans scénario GFDL

Figure 15: Tension du vent dans la simulation de contrôle et ses anomalies dans les trois scénarios.

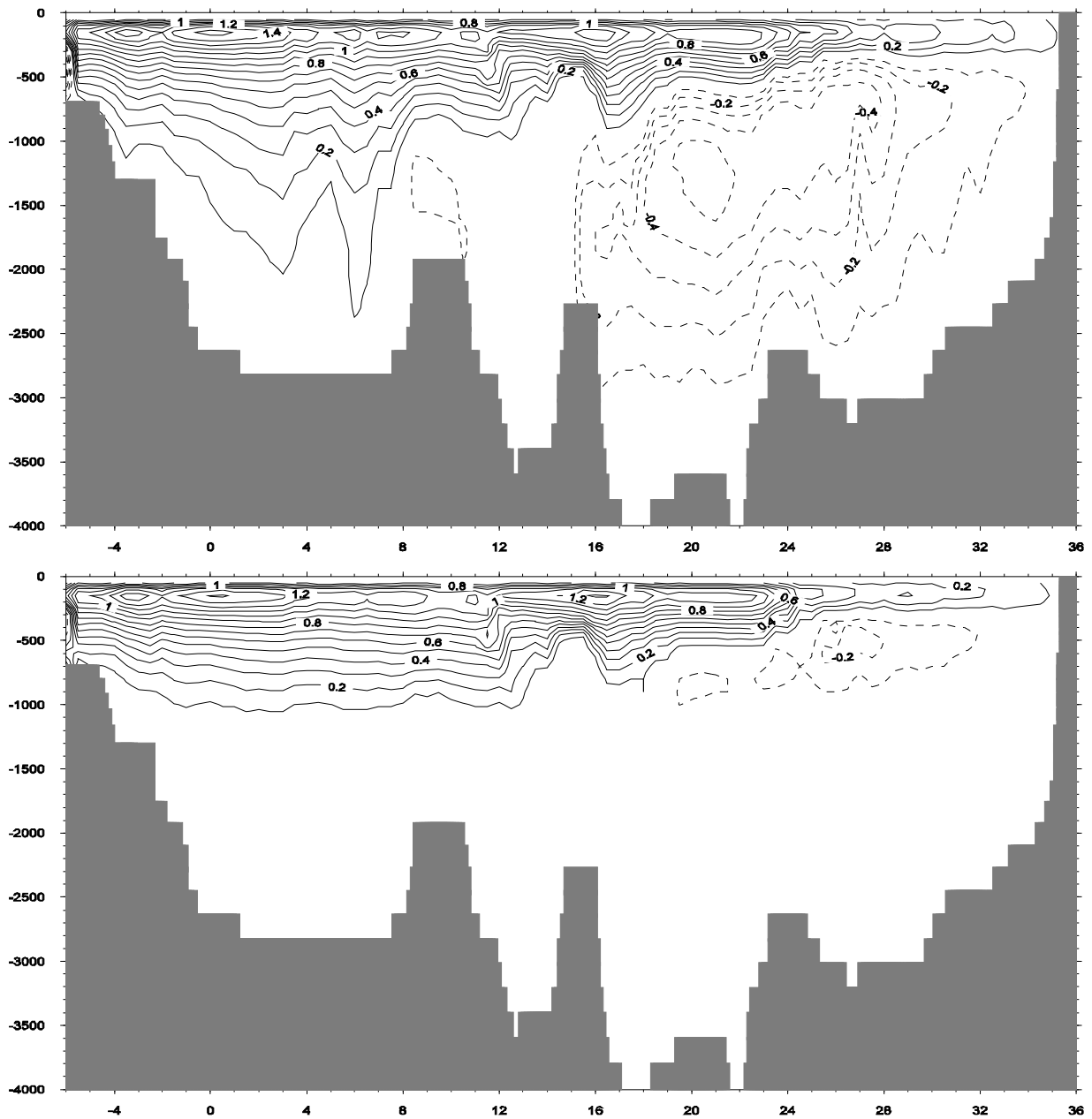


Figure 16: Sections vertical pour la fonction zonale de retournement (Zonal Overturning stream Function in english) moyennée sur la période 2070-2099 pour la simulation de contrôle (haut) et le scénario (bas). Les valeurs positives (négatives) correspondent à une circulation des masses d'eau dans le sens (contraire) des aiguilles d'une montre.

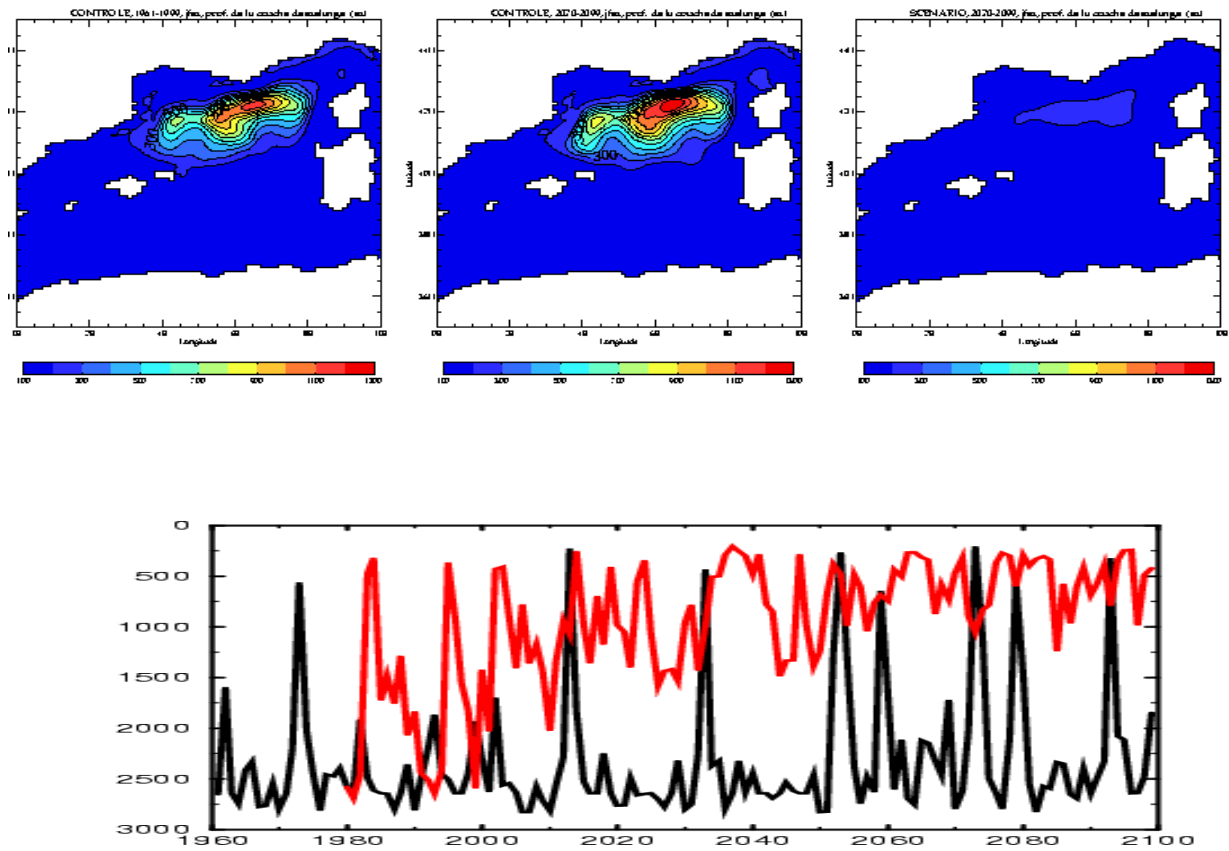


Figure 17: Profondeur (m) de la couche de mélange océanique pour le Golfe du Lion, dans les simulations à Météo-France avec Arpège-Climat et MED8. Les trois cartes en haut représentent la simulation de contrôle pour le climat actuel, la simulation de contrôle (sans réchauffement global) 100 ans plus loin, et la situation du réchauffement global pour la fin du 21e siècle. Les deux courbes en bas représentent la moyenne dans le Golfe du Lion pour la simulation de contrôle (courbe noire) et la simulation du scénario A2.