

MODELES CLIMATIQUES ET EVOLUTION PLUVIOMETRIQUE ENVISAGEABLE SUR LE BASSIN MEDITERRANEEN

**SERVAT Eric, ARDOIN-BARDIN Sandra, PATUREL Jean Emmanuel,
DEZETTER Alain, MAHÉ Gil**

UMR HydroSciences Montpellier (CNRS – IRD – UM1 – UM2), Univ.
Montpellier 2, Place Eugène Bataillon, cc MSE, 34095 Montpellier Cedex 5.
e-mail : eric.servat@msem.univ-montp2.fr

RESUME Les modèles climatiques retenus dans le cadre des études menées au sein de l'Intergouvernemental Panel on Climate Change (IPCC) constituent une référence pour étudier l'évolution du climat dans les décennies à venir. Seuls certains modèles et certains scénarios d'émissions de gaz à effet de serre ont été retenus pour cette étude, à partir de critères fondés sur : (i) la disponibilité de données observées sur les périodes de simulation de manière à pouvoir juger de la qualité des séries générées par les algorithmes, (ii) le fait qu'un scénario d'émission de gaz à effet de serre donné soit disponible et utilisable avec plusieurs des modèles sélectionnés de façon à autoriser les comparaisons. On procède ici à une évaluation des résultats fournis par les différents modèles utilisés avec les scénarios disponibles qui leur correspondent pour le bassin méditerranéen. Cette appréciation des performances repose sur la comparaison des données observées et des données générées à des pas de temps annuel et saisonnier. On s'intéressera également au devenir des précipitations pour les décennies à venir, sur la base des variations attendues aux trois horizons définis par l'IPCC (2020, 2050, 2080). La conclusion principale souligne une certaine disparité en ce qui concerne la capacité des algorithmes utilisés à reproduire la réalité observée et la grande variabilité des résultats actuellement disponibles en ce qui concerne l'évolution de la pluviométrie sur le bassin méditerranéen au cours du 21^{ème} siècle.

Mots clefs : bassin méditerranéen, GCM, précipitations, scénarios climatiques, changement climatique

INTRODUCTION

Bien que les scientifiques aient amélioré leurs connaissances sur les émissions de gaz à effet de serre et leurs conséquences, l'évolution du climat reste un défi considérable pour l'humanité. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) ont ainsi créé, en 1988, l'Intergouvernemental Panel on Climate Change (IPCC) afin d'évaluer les informations disponibles sur la science, les

effets, les aspects socio-économiques et les options d'atténuation de l'évolution du climat et d'adaptation à cette évolution.

L'IPCC annonce qu'il dispose aujourd'hui d'analyses d'une très grande fiabilité qui lui permettent d'affirmer que les activités humaines ont contribué au réchauffement observé au cours des cinquante dernières années (IPCC, 2001). Les prévisions pour le changement climatique convergent vers une augmentation de la température et une élévation du niveau moyen des mers. Mais l'intervalle de variation de ces prévisions dépend des modèles climatiques (GCM) utilisés et de la prise en compte de tel ou tel scénario d'émissions de gaz à effet de serre. Ainsi, les modèles climatiques ne prévoient-ils pas tous les mêmes modifications pour le 21^{ème} siècle, mais ce sont, néanmoins, à l'heure actuelle, les seuls outils à notre disposition pour tenter d'évaluer l'impact des changements climatiques futurs.

La démarche adoptée dans cette étude vise à comparer les sorties des modèles climatiques avec les données observées pour des variables clés, comme les précipitations, afin de contribuer à l'estimation des ressources en eau pour les décennies à venir sur le bassin méditerranéen.

ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE DES GCM : DONNÉES ET MÉTHODES

ORIGINE ET CARACTERISTIQUES DES DONNEES CLIMATIQUES

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont spatialisées sous forme de grilles avec des résolutions différentes, propres à chaque modèle climatique. Les données observées couvrent la période 1950-2000 et ont été obtenues auprès du Climatic Research Unit (CRU) de l'Université d'East Anglia (UK). Il s'agit de grilles mensuelles de données pluviométriques à la résolution du demi-degré carré, construites par interpolation de séries pluviométriques sélectionnées pour la qualité et la longueur de leurs observations (New et al., 2000). Les autres données climatiques utilisées dans cette étude proviennent des simulations produites par les GCM et sont extraites des archives du Data Distribution Centre de l'IPCC (<http://ipcc-ddc.uea.ac.uk>). Ces archives contiennent les simulations d'évolution climatique obtenues avec sept modèles climatiques couplés océan-atmosphère et conduites en utilisant des scénarios d'émissions de gaz à effets de serre et d'aérosols. Ces scénarios d'émissions de gaz à effet de serre – SRES (Nakicenovic *et al.*, 2000) – perturbent le climat et peuvent avoir des incidences sur les systèmes naturels et anthropisés. Il existe quatre familles principales de scénarios d'émissions de gaz à effets de serre, qui représentent des évolutions différentes aux plans démographique, social, économique, technologique et environnemental (Figure 1).

Quatre modèles de type GCM ont été choisis parmi ceux mentionnés dans le troisième rapport d'évaluation de l'IPCC (Tableau 1). Ce choix est motivé par

la large utilisation de ces modèles pour les projections climatiques et la disponibilité des données en ligne. Ces modèles ont été créés par des organismes distincts et possèdent ainsi leurs caractéristiques propres. Nous ne procéderons pas ici à une description détaillée de leur structure, de leur mode de fonctionnement et de leurs différences, préférant renvoyer à l'IPCC (2001) et à leurs concepteurs, mais nous indiquons, néanmoins, les origines des quatre modèles choisis ci-dessous :

- ✓ ECHAM4/OPYC3 : ce modèle est décrit par Roeckner et al. (1996). Il provient du "Max Planck Institut für Meteorologie" en Allemagne.
- ✓ HadCM3 : décrit par Gordon *et al.* (2000), ce modèle a été développé par le "Hadley Centre" au Royaume Uni.
- ✓ CSIRO-MK2 : ce modèle australien a été développé par le "Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation", Gordon et O'Farrell (1997) ;
- ✓ NCAR-DOE PCM : ce modèle américain a été développé au "National Centre for Atmospheric Research", Washington et Meelh (1996).

ZONE D'ETUDE

Il a semblé nécessaire de prendre en compte l'ensemble du Bassin Méditerranéen dans la mesure où, lorsqu'il s'agit de phénomènes climatiques de cette envergure (changement climatique), une telle échelle spatiale est totalement justifiée. La zone étudiée correspond donc à une fenêtre dont les limites sont 17° W à 47° E en longitude et 25° N à 45° N en latitude. Un des problèmes majeurs dans l'utilisation, l'analyse et la comparaison des données climatiques est la résolution spatiale. Chaque GCM a sa propre grille et son propre système de numérotation des cellules. Pour toutes les grilles, les longitudes sont numérotées d'Est en Ouest à partir du méridien de Greenwich, les latitudes sont numérotées à partir des pôles Nord ou Sud suivant le modèle climatique.

Chaque modèle climatique ayant une résolution différente, la densité du maillage correspondant est très variable sur la zone étudiée (Figure 2). L'examen de la taille des cellules montre, cependant, que le modèle du CSIRO utilise le maillage le plus grossier comparé aux autres. La grille définie à la résolution du demi-degré carré par le CRU pour les données observées est, ainsi, beaucoup plus précise que toutes celles utilisées dans les modèles climatiques.

METHODOLOGIE

La méthodologie appliquée pour évaluer la performance des GCM repose sur la comparaison de leurs données de précipitations avec celles observées sur le bassin méditerranéen. Ces comparaisons s'effectuent aux pas de temps annuel et saisonnier au moyen de différents critères statistiques : moyenne, erreur relative, variance, test de Cochran et coefficient de corrélation (Casenave, 2004). Les trois saisons considérées sont : (1) de janvier à mai, (2) de juin à septembre et (3) d'octobre à décembre. Les comparaisons sont réalisées à la résolution du GCM étudié. Les données observées du CRU doivent donc être agrégées à la résolution de chacun des GCM Ardoin-Bardin *et al.* (2005).

Les résultats sont donnés sous formes de représentations cartographiques des cumuls annuels (par sur ou sous-estimations des précipitations) et les comportements saisonniers par le biais des coefficients de corrélations qui permettent d'évaluer la capacité des modèles climatiques à reproduire la dynamique de la saison au-delà de la seule variabilité interannuelle.

ÉVOLUTION PLUVIOMÉTRIQUE SUR LA PÉRIODE 1950-1998 : COMPARAISON DES SORTIES GCM AVEC LES OBSERVATIONS

Tous les résultats de cette évaluation de la performance des modèles climatiques à reproduire les précipitations observées ne peuvent être représentés graphiquement. Seule la comparaison des cumuls annuels de précipitations simulés par les quatre GCM avec les cumuls annuels observés (données du CRU) sur la période 1950-2000 pour chaque cellule sur le bassin Méditerranéen est donnée en figure 3. Pour chaque modèle climatique étudié, nous donnerons les résultats à l'échelle annuelle et à l'échelle saisonnière (répartitions géographiques, cumuls annuels et saisonniers, variabilité interannuelle).

MODELE HADCM3 – SCENARIOS A2 ET B2 – PERIODE 1950-2000

Le modèle HadCM3 reproduit assez bien la répartition spatiale des précipitations annuelles observées sur la Méditerranée. On retrouve les précipitations annuelles très faibles (<250 mm) au Nord de l'Afrique et une zone de précipitations importantes au niveau des Alpes. Cependant, il y a peu de cellules sur la fenêtre d'étude où les cumuls annuels sont bien estimés (erreurs relatives <20%). Toute la zone correspondant à l'Afrique du Nord est caractérisée par des erreurs relatives très grandes (>50%) : les précipitations y étant très faibles, une erreur absolue de quelques dizaines de millimètres peut faire varier rapidement l'erreur relative. Il est difficile de statuer quant à une tendance du modèle HadCM3 à sur ou sous-estimer les précipitations en milieu méditerranéen puisque dans 58% des cas les précipitations sont sous-estimées (mêmes résultats entre les scénarios A2 et B2), comme le montre la

figure 3. De plus, pour seulement 4 cellules sur les 131 qui constituent la fenêtre étudiée il existe une corrélation entre les valeurs observées et celles fournies par HadCM3. Ce constat montre que le modèle n'est pas en mesure de reproduire la dynamique interannuelle observée.

A l'échelle saisonnière, l'erreur relative moyenne calculée pour chaque cellule et pour chacune des trois saisons est généralement très importante pour la plupart des cellules (>50% voire >100%). Selon les résultats du test de Cochran, on remarque que la saison la mieux modélisée sur cette fenêtre « Méditerranée » est la période estivale. Pour les deux autres saisons la corrélation n'existe que pour la partie orientale de la mer Méditerranée, sur les côtes de la Libye, de l'Egypte, de la Turquie et de la Grèce. Dans aucun des cas (combinaison saisons/scénarios), et en ce qui concerne la dynamique des saisons, les cellules correspondant au Maghreb ne laissent apparaître des résultats de modélisation satisfaisants.

Avec le modèle HadCM3, les précipitations dans le sud de la fenêtre sont globalement très mal modélisées que ce soit au niveau des volumes annuels ou mensuels ou, encore, de la dynamique des saisons. La variabilité interannuelle n'est pas respectée et les années particulières ne peuvent donc pas être prédites, dans le Nord comme dans le Sud de la région étudiée. Sur les deux tiers Nord de la fenêtre, on peut cependant se fier aux moyennes et variances des valeurs données par le modèle, ainsi qu'à la variabilité saisonnière pour la période estivale.

MODELE ECHAM4/OPYC3 – SCENARIOS A2 ET B2 – PERIODE 1990-2000

Le modèle ECHAM4 reproduit correctement la répartition spatiale des différentes zones climatiques autour de la Méditerranée avec une augmentation des pluies annuelles vers le Nord, une zone de climat désertique au Sud, et une zone de plus faibles pluies dans le Nord-est de la fenêtre. Les erreurs relatives sont très grandes (>50%) dans la région à climat aride, au nord de l'Afrique, alors qu'elles sont moins importantes (entre 20% et 50%) sur la partie centrale et sur l'Est de la fenêtre d'étude et faibles sur la partie correspondant à l'Europe de l'Ouest (<20%). Le modèle ECHAM4 surestime les précipitations sur le Maghreb où les totaux annuels sont les plus faibles, ainsi que sur la majeure partie du Nord de la zone étudiée. Au contraire, les précipitations en Italie ou dans le sud Est de la fenêtre (Egypte, Liban, Syrie, etc.) sont sous-évaluées (Figure 3). Seules 5 cellules sur 191 pour le scénario A2 et 6 cellules pour le scénario B2 ont un coefficient de corrélation supérieur à la limite imposée par le test, ce qui montre que la variabilité observée d'une année sur l'autre n'est donc pas reproduite par ECHAM4.

A l'échelle saisonnière, pour la très grande majorité des cellules, l'erreur relative est très importante et dépasse les 50%. Le résultat du test sur la

corrélations effectuées pour chaque saison entre 1990 et 2000 montre que c'est la saison estivale dont la dynamique est la mieux reproduite. Cette remarque concerne le nord du Maghreb, le sud de l'Italie et de l'Espagne ainsi que la Turquie. Pour les deux autres saisons, très peu de cellules montrent une corrélation entre valeurs observées et simulées par les modèles climatiques.

Les conclusions concernant ce modèle sont similaires à celles faites pour le modèle HadCM3. Avec le modèle ECHAM4, les faibles précipitations du Sud sont très mal modélisées tant du point de vue qualitatif que quantitatif. Sur toute la partie Nord, les moyennes et variances annuelles sont assez bonnes, mais la variabilité interannuelle n'est pas du tout reproduite. En ce qui concerne les saisons, les volumes calculés par les modèles ne correspondent pas aux volumes observés, mais la dynamique de la saison estivale est plus ou moins bien reproduite selon les régions.

Modèle NCAR-PCM – scénarios A2 et A1B – période 1981-2000

Il y a une assez bonne adéquation entre les précipitations observées et celles simulées par le modèle NCAR-PCM, puisqu'on observe une diminution progressive des cumuls du Nord vers le Sud. Les deux scénarios disponibles, A2 et A1B, donnent à peu près les mêmes résultats. Pour la majorité des cellules du Sud de la fenêtre, l'erreur moyenne est supérieure à 50% ce qui est très important. Pour le reste de la fenêtre, on ne peut distinguer de zone particulière, la plupart des erreurs étant comprises entre 20% et 50%. Contrairement aux deux modèles étudiés précédemment, c'est ici la partie Nord qui est globalement surestimée ainsi que quelques cellules en Algérie, Libye et Egypte et on note une sous-estimation au niveau de la mer Méditerranée (Figure 3). De plus, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence entre les valeurs observées et simulées, soulignant ainsi l'incapacité du modèle NCAR-PCM à reproduire les variabilités interannuelles observées des précipitations.

A l'échelle saisonnière, les erreurs commises par le modèle NCAR-PCM sur les volumes précipités sont donc très importantes sur toute la Méditerranée et, ce, quelle que soit la saison considérée. On peut cependant faire une différence quant à l'efficacité du modèle en fonction des saisons. On remarque, en effet, qu'il existe très peu de cellules pour lesquelles données modélisées et données observées sont corrélées pour les mois d'octobre à décembre. Pour les deux autres saisons, par contre, cette corrélation existe pour une partie des cellules majoritairement situées dans la moitié Nord de la fenêtre.

Avec le modèle NCAR-PCM, au niveau des totaux annuels, la distinction Nord/Sud est moins évidente qu'avec les deux modèles précédents, mais la variabilité interannuelle donnée par le modèle n'est toujours pas fiable. Au niveau saisonnier, les corrélations sont mauvaises soulignant une incapacité à reproduire la variabilité observée sur de tels pas de temps. Les volumes mensuels sont très mal évalués par le modèle.

MODELE CSIRO-MK2 – SCENARIOS A1, A2, B1 ET B2 – PERIODE 1961-2000

Globalement, et quel que soit le scénario d'émission de gaz à effet de serre, les précipitations annuelles sont assez bien reproduites. Il apparaît cependant que, sur la France, les précipitations sont surestimées par le modèle et que celles du quart Nord-Est de la fenêtre sont sous-estimées. Cependant, ces dernières ne concernent pas directement le Bassin Méditerranéen. Comme pour les autres modèles, les faibles cumuls observés au nord de l'Afrique sont globalement mal reproduits par CSIRO, alors que les précipitations plus importantes calculées pour l'Europe occidentale sont plus proches des totaux observés. Globalement, les valeurs simulées par le modèle sont supérieures à celles observées sur la partie nord et inférieures à celles observées sur la partie sud de la fenêtre (Figure 3). Le test effectué sur les coefficients de corrélation ne montre aucune relation entre valeurs issues du modèle et observations. Le modèle n'est donc pas en mesure de reproduire les années excédentaires ou déficitaires.

A l'échelle saisonnière, les conclusions sont identiques pour les quatre scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Les zones où il existe une corrélation sont : (i) entre janvier et mai, la moitié Est de la mer Méditerranée et une partie de l'Europe occidentale (Italie, Allemagne, Suisse), (ii) entre juin et septembre, l'ensemble du pourtour méditerranéen (mais essentiellement les cellules « maritimes »), (iii) entre octobre et décembre, la Turquie et les pays limitrophes. Cette corrélation est plus marquée pour les mois d'été que pendant les autres saisons.

Avec le modèle CSIRO-Mk2, au niveau annuel, seules les valeurs moyennes sont fiables et, comme avec les trois autres modèles, les faibles pluies du nord de l'Afrique ne sont pas bien reproduites. Les variabilités saisonnières de janvier à septembre sont assez bien retracées sur certaines parties de la fenêtre (à l'exclusion du Sud), contrairement aux mois d'octobre, novembre et décembre.

DEVENIR DES PRÉCIPITATIONS EN MÉDITERRANÉE POUR LE 21^{ème} SIÈCLE

Au vu de ce qui précède, il est aisé de comprendre que les données issues des modèles climatiques ne possèdent pas, à l'heure actuelle, le niveau de fiabilité qui rendrait possible leur utilisation immédiate dans des études d'impacts. Les données calculées sont, en effet, très éloignées des données observées, et, ce, quelques soient le modèle et les périodes considérés. Des méthodologies d'utilisation de ces données ont, cependant, été proposées (Ardoin-Bardin *et al.*, 2005). S'il est envisageable de les utiliser, dans le cadre d'approches purement scientifiques destinées, entre autres, à faire progresser la réflexion des concepteurs et des utilisateurs de modèles climatiques et de leurs

résultats, il serait totalement déraisonnable de les prendre en compte, dès aujourd'hui, pour bâtir des scénarios utilisés ensuite pour décider de politiques d'équipements et engager des investissements lourds et coûteux.

Cependant, il est intéressant d'étudier ce que représentent les données générées, pour le 21^{ème} siècle, par les modèles climatiques pris en compte dans le cadre de cette étude. La méthodologie employée pour étudier le devenir des précipitations, repose sur :

- ✓ la prise en compte des 3 horizons définis par l'IPCC, à savoir 2006-2035 (nommé 2020), 2036-2065 (nommé 2050) et 2066-2095 (nommé 2080) ;
- ✓ et le calcul des variations relatives (exprimées en pourcentages) entre les précipitations simulées par les GCM sur ces 3 horizons par rapport à celles sur la période de référence (1990-2000), seule période commune aux quatre modèles climatiques étudiés.

Cela permet de définir les tendances pour l'ensemble des possibilités offertes par les combinaisons modèles climatiques – scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Ces tendances sont exploitées sous la forme de représentations cartographiques des répartitions spatiales des augmentations / diminutions prévues par les différents modèles comme, par exemple, à l'horizon 2080 (Figure 4).

La première remarque est que les résultats sont extrêmement variés d'un modèle climatique à l'autre et d'un scénario d'émission de gaz à effet de serre à l'autre. Ce qui rajoute au sentiment de manque de fiabilité déjà exprimé auparavant. On constate ensuite que les modèles climatiques HadCM3 et ECHAM4 réagissent de manière similaire à l'utilisation des scénarios A2 et B2. Avec ces deux modèles climatiques, le scénario A2 prévoit plutôt une diminution des précipitations sur l'ensemble du pourtour méditerranéen alors que le scénario B2 montre plutôt une augmentation des précipitations sur une grande partie de la fenêtre. Pour les deux autres modèles ces tendances ne sont pas réellement confirmées.

Cet exemple montre bien la difficulté qu'il y a à dégager une ligne directrice commune aux différentes combinaisons de modèles et de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et que, à l'heure actuelle, aucune conclusion consistante et formelle ne peut donc être réellement établie en ce qui concerne les devenirs des précipitations pour les décennies à venir sur le bassin méditerranéen.

CONCLUSION

Que retenir ?

Cette étude s'est appuyée sur une comparaison des données simulées par les modèles climatiques avec les données observées sur une fenêtre

« Méditerranée », avant de s'intéresser aux données générées par ces modèles.

Ce qui ressort avant tout, c'est le manque de fiabilité des données fournies par les GCM. Sur la période pour laquelle on dispose d'observations, ces données sont extrêmement éloignées de la réalité : elles ne correspondent pas aux valeurs observées, elles ne reproduisent pas la variabilité interannuelle et elles se montrent incapables de restituer un semblant de variabilité intra-annuelle. De plus, la multiplicité des résultats issus des différentes combinaisons entre modèles climatiques et scénarios d'émission de gaz à effet de serre fait qu'il est difficile de définir une tendance générale d'évolution des précipitations sur le bassin méditerranéen pour le 21^{ème} siècle.

ET APRES ?

Les sources utilisées pour cette étude font l'objet d'un consensus car elles sont issues de l'IPCC, référence scientifique internationale dans le domaine. Les GCM ne sont pas vraiment performants en ce qui concerne la variable « précipitation ». Du coup, il paraît illusoire de vouloir utiliser les données générées par ces GCM pour étudier les impacts du changement climatique au 21^{ème} siècle. Leur analyse laisse voir une grande hétérogénéité des prévisions tant du point de vue quantitatif que de leur répartition spatiale. S'appuyer sur de tels résultats pour générer des chroniques de données devant servir à l'élaboration de scénarios semble actuellement peu réaliste. Les modèles climatiques vont progresser, mais, d'ici là, l'élaboration de chroniques de pluie devra continuer à s'appuyer aussi sur des approches empiriques ou statistiques, se contentant de ne prendre, dans les sorties de GCM, que des éléments très généraux pouvant être utilisés de manière plausible.

RÉFÉRENCES

- Ardoin-Bardin S., Servat E., Dezetter A., Mahé G., Paturel J.E., Dieulin C., Casenave L. (2005). Évaluation des impacts du changement climatique sur les ressources en eau d'Afrique de l'Ouest et Centrale. In Frank S., Wagener T., Bøgh E., Gupta H.V., Bastidas L., Nobre C. et De Oliveira Galvão C. (Eds): Regional Hydrological Impacts of Climate Change – Hydroclimatological Variability. Proceedings of the VIIth Scientific Assembly of AISH, 3-9 April 2005, Foz do Iguazu (Brazil). IAHS Publ. **296**, 194-202.
- Casenave, L. (2004) Hydro-climatic variability: comparison of different global circulation model in western Africa. Master Thesis. University of Chalmers. Sweden.
- Gordon C., Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood R.A. (2000) The simulation of SST, sea ice extents

- and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Clim. Dyn.* **16**, 147-168.
- Gordon H.B., O'Farrell S.P. (1997) Transient climate change in the CSIRO coupled model with dynamic sea ice. *Mon. Weather Rev.* **125**(5), 875-907.
- IPCC (2001) Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the IPCC. (Ed. by McCarthy J.J., Canziani O.F., Leary N.A., Dokken D.J., White K.S.) Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Nakicenovic N., Alcamo J., Davis G., de Vries B., Fenhann J., Gaffin S., Gregory K., Grübler A., Jung T. Y., Kram T., La Rovere E. L., Michaelis L., Mori S., Morita T., Pepper W., Pitcher H., Price L., Raihi K., Roehrl A., Rogner H.H., Sankovski A., Schlesinger M., Shukla P., Smith S., Swart R., van Rooijen S., Victor N., Dadi Z. (2000) IPCC Special Report on Emissions Scénarios. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- New M., Hulme M., Jones P. (2000) Representing twentieth century space-time climate variability. Part II: development of a 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Clim.* **13**(13), 2217-2238.
- Roeckner E., Arpe K., Bengtsson L., Christoph M., Claussen M., Dümenil L., Esch M., Giorgetta M., Schlese U., Schulzweida U. (1996) The atmospheric general circulation model ECHAM-4: models description and simulation of present-day climate. Max-Planck Institute for Meteorology, Report 218, Hamburg, Germany.
- Washington W.M., Meehl G.A. (1996) High latitude climate change in a global coupled ocean-atmosphere-sea ice model with increased atmospheric CO₂. *J. Geophys. Res.* **101**, 12795-12801.

TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques principales des données climatiques : résolution, période disponible, scénario d'émission de gaz à effet de serre utilisé

Modèle	Résolution	Période	Scénario d'émission de gaz à effet de serre
CSIRO-Mk2	R21	1961-	A1,A2,B1,B2
	(~3.2° × 5.6°)	2100	
ECHAM4/OPYC3	T42	1990-	A2,B2
	(~2.8° × 2.8°)	2100	
NCAR-PCM	T42	1981-	A1b,A2
		2099	
HadCM3	(~2.8° × 2.8°)	1950-	A2,B2
	2.5° × 3.75°	2099	
Observations (CRU)	0.5° × 0.5°	1950-2000	-

FIGURES

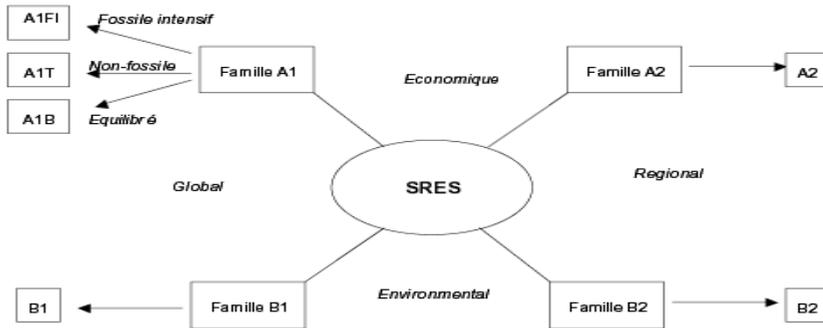


Figure 1. Représentation schématique des quatre familles de scénarios

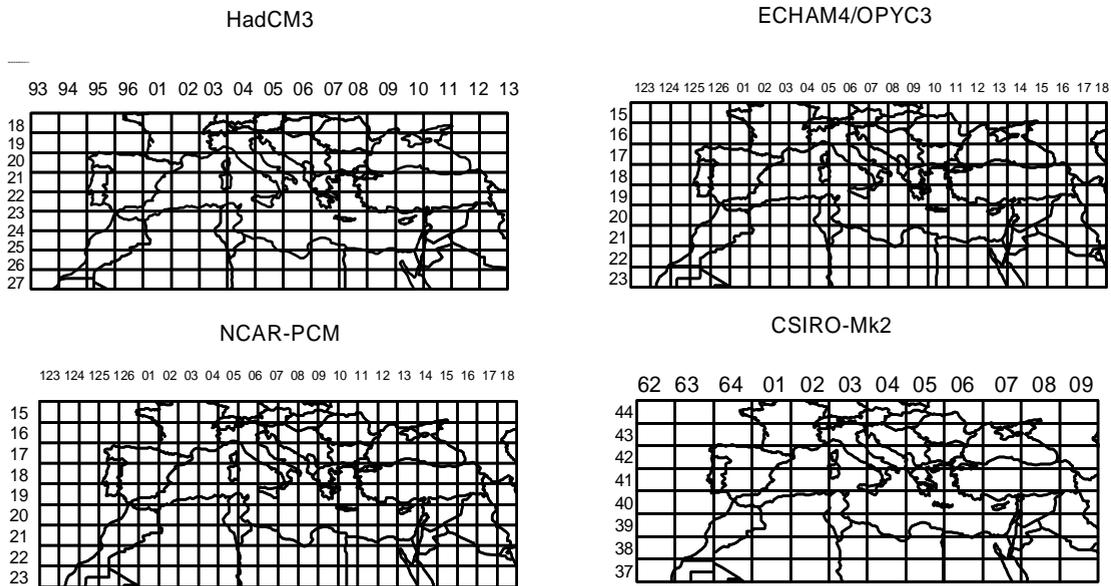
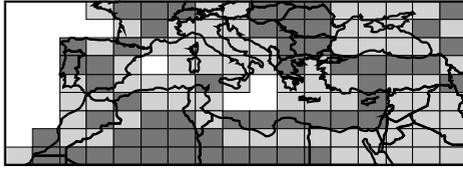


Figure 2. Fenêtre étudiée et maillage correspondant pour chacun des GCM pris en compte.

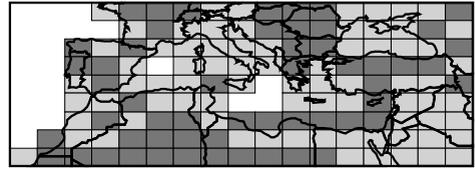
PERIODE 1950-2000

HadCM3

Scénario A2

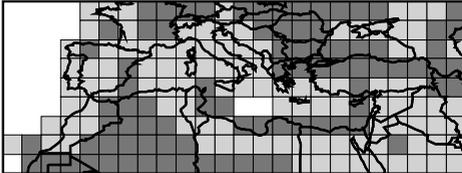


Scénario B2

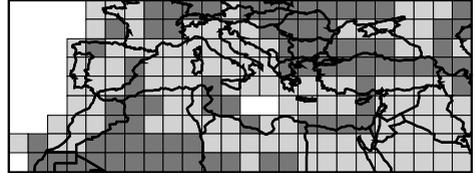


ECHAM4

Scénario A2

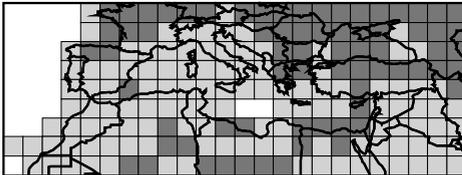


Scénario B2

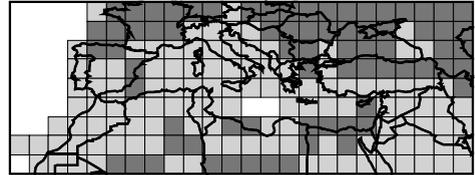


NCAR

Scénario A1B

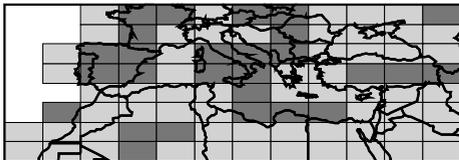


Scénario A2

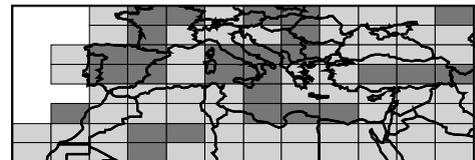


CSIRO

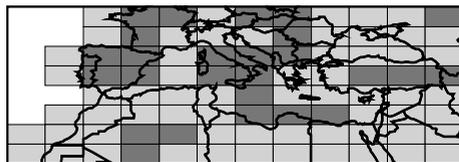
Scénario A1



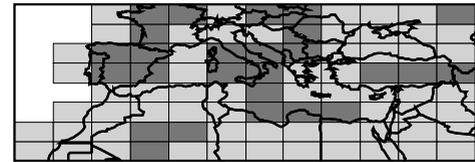
Scénario A2



Scénario B1



Scénario B2



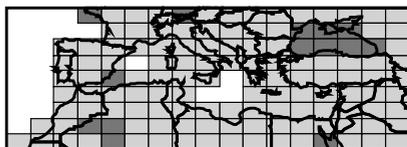
■ augmentation □ diminution

Figure 3. Répartition géographique des augmentations / diminutions des cumuls annuels de précipitations prévues par les quatre modèles climatiques sur la période 1950-2000 par rapport aux observations (données du CRU).

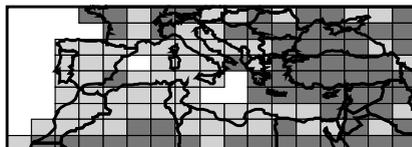
HORIZON 2080

HadCM3

Scénario A2

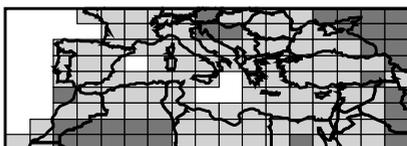


Scénario B2

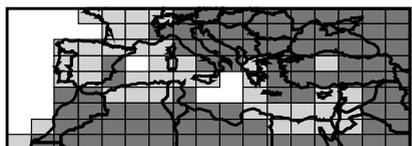


ECHAM4

Scénario A2

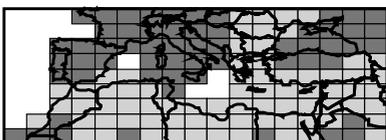


Scénario B2

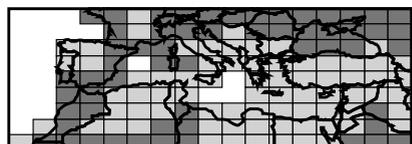


NCAR

Scénario A1B

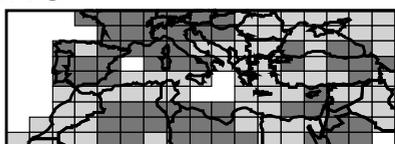


Scénario A2

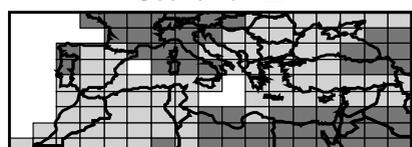


CSIRO

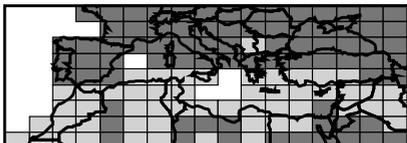
Scénario A1



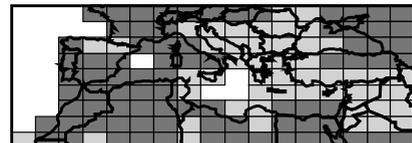
Scénario A2



Scénario B1



Scénario B2



■ augmentation ■ diminution

Figure 4. Répartition géographique des augmentations / diminutions des précipitations prévues par les quatre modèles climatiques à l'horizon 2080, à la résolution du modèle HadCM3 (2.5° x 3.75°).