

# Modélisation du climat méditerranéen et projections climatiques

par Antonella SANNA

**Cet article résume les principaux résultats du projet CIRCE dont l'objectif principal était la recherche et l'analyse du climat méditerranéen actuel et dans les conditions du futur, à travers des simulations numériques. Les différents scénarios sont présentés.**

## Contexte

La région méditerranéenne est tout particulièrement intéressante du point de vue climatologique, de par sa localisation dans une zone qui transite entre des variables tropicales et des latitudes moyennes, ainsi que par son orographie complexe et son littoral. En outre, c'est une région très densément peuplée, surtout le long des côtes, et qui a récemment été identifiée comme l'un des principaux *hotspots* pour le changement climatique (GIORGİ 2006).

Au cours des dernières années, la communauté scientifique a montré un vif intérêt à l'égard de la région méditerranéenne et de son climat, au travers d'un certain nombre de projets internationaux, tels que EU PRUDENCE<sup>1</sup> (CHRISTENSEN *et al.* 2007) et ENSEMBLES (CHRISTENSEN *et al.* 2009). Ces projets se sont intéressés à la variabilité du climat méditerranéen et aux futures caractéristiques du point de vue atmosphérique, à l'aide de modèles atmosphériques, forcés par des conditions limites (CL) basses et, par conséquent, ne tenant compte d'aucune rétroaction air-mer. En outre, les températures de surface de la mer (TSM) utilisées comme CL pour l'interface air-mer proviennent de résultats de modèles de circulation générale (MCG), et ont donc une résolution trop grossière pour reproduire correctement les caractéristiques à petite échelle des dynamiques de la Méditerranée. À cet égard, MARCOS et TSIMPLIS (2008), analysant les projections climatiques du CMIP3 sur la Méditerranée au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, ont conclu que leur résolution était trop grossière pour simuler de façon réaliste les dynamiques du climat méditerranéen d'aujourd'hui. Par conséquent, ces

1 - PRUDENCE : Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeaN Climate change risks and Effects

modèles ne sont pas fiables en tant que scénarios de projections.

SOMOT *et al.* (2008), en effectuant une série de simulations sur la région de la Méditerranée, à l'aide d'un MCG couplé avec un module marin interactif de haute résolution pour la simulation de la mer Méditerranée, ont trouvé des résultats en bon accord avec les observations, en ce qui concerne le climat actuel. Dans leurs résultats, la région méditerranéenne s'est avérée assez sensible aux dynamiques de sa mer interne, en termes de signaux de changement climatique.

L'expérience CIRCE a été conçue en suivant l'esprit de SOMOT *et al.* (2008) et consacrée à l'analyse et à la compréhension de la variabilité et du changement du climat dans la région méditerranéenne.

**Fig. 1 :**  
Evolution des anomalies de TSM (en ce qui concerne 1961-1990), simulées avec les modèles CIRCE (lignes noires fines) et avec les modèles CMIP3 (lignes pointillées). La courbe noire fine correspond à la moyenne CIRCE multi modèle, alors que la zone ombrée correspond à la déviation standard CIRCE multi modèle wrt la moyenne multi modèle.  
Pour mettre en évidence les tendances à long terme, la variabilité interannuelle a été filtrée en appliquant une moyenne continue sur 5 ans.  
(D'après Gualdi *et al.* 2013)

Les modèles CIRCE ont une résolution typique, allant de 25 km à 80 km pour la composante atmosphérique, tandis que la résolution des modules méditerranéens varie de 7 km à 12 km. Tous les modèles partent des conditions océaniques initiales fournies par des données climatologiques (Levitus [LEVITUS 1982] ou MedAtlas-II [MEDAR Group 2002]). Les composants atmosphériques sont créés grâce à des simulations de type AMIP. Les intégrations de modèle commencent à partir d'un état d'équilibre, obtenu après une période *spin-up* (période de retour à l'équilibre du modèle) avec des concentrations permanentes de gaz à effet de serre (GES), correspondant aux conditions des années 50. Ensuite les modèles ont été intégrés pour la période 1951-2050, utilisant les GES prescrits selon les observations obtenues jusqu'en 2000 et du scénario A1B SRES de 2011 à 2050. Plus de détails sur le projet et les modèles utilisés peuvent être trouvés dans GUALDI *et al.* (2012 et 2013).

Tous les résultats présentés ici proviennent d'anciennes publications (GUALDI *et al.* 2012, GUALDI *et al.* 2013, DUBOIS *et al.* 2012).

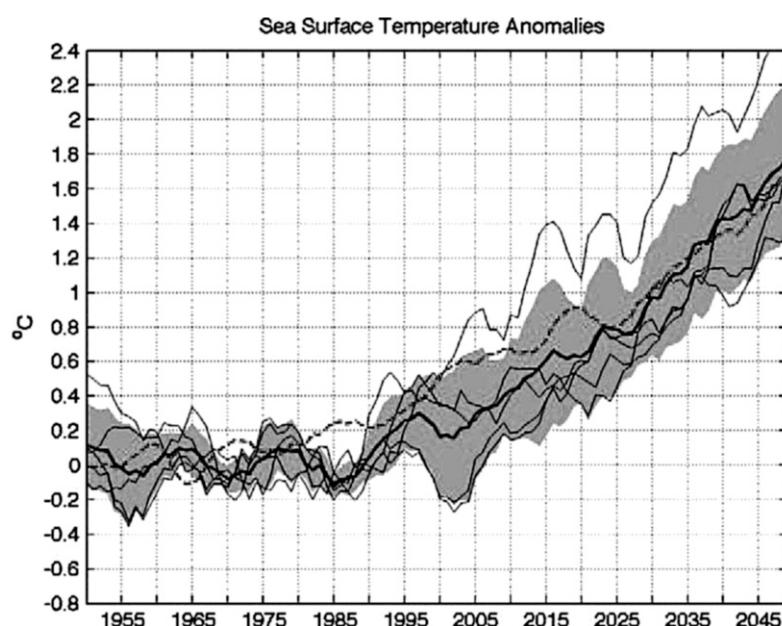
## Les modèles CIRCE

L'approche du modèle CIRCE est assez nouvelle, incluant à la fois des MCG de climat global et des modèles climatiques régionaux (MCR). Le principal facteur innovant dans les modèles concernés est la présence du facteur marin interactif à très haute résolution pour la simulation réaliste des dynamiques de la mer Méditerranée.

## Validation du modèle : climat actuel

La validation du modèle CIRCE se concentre sur les champs de surface de température à 2 mètres du sol (T2m) et de précipitations (évaluées pendant les saisons d'été et d'hiver boréales) pour l'atmosphère, et de TSM et de flux de masse et de chaleur pour les composants marins.

Le jeu de données d'observation utilisé pour le T2m et les précipitations est le système d'observation par quadrillage CRU TS 3 (MITCHELL et JONES 2005). En ce qui concerne l'évaluation de la composante marine, le bilan de chaleur et de masse à Gibraltar a été évalué par rapport aux résultats obtenus dans deux publications récentes SANCHEZ-GOMEZ *et al.* (2011), basée sur des estimations NOCS et HOAPS, et PETTENUZZO *et al.* (2010), basée sur un *downscaling* (réduction d'échelle) statistique de réanalyses ERA40. Les valeurs actuelles de TSM sont comparées à différents jeux de données (réanalyses ERA40, Reynolds OI RSSTv2, ENEA OISST, MedAtlas-II).



Les résultats du modèle sont également comparés avec les MCG CMIP3 les plus récents, à la fois pour les composants atmosphériques et océaniques, dans le but de mettre en avant les améliorations possibles ou les lacunes découlant de la mise en place de l'expérimentation choisie au sein du projet CIRCE. Les champs atmosphériques et les flux air-mer sont aussi comparés aux résultats du projet ENSEMBLES, qui sont caractérisés par une résolution plus haute.

## Atmosphère

Les principales caractéristiques du climat actuel sont plutôt bien reproduites par les modèles CIRCE. Les principales caractéristiques saisonnières observées de T2m et de champs de précipitation (non illustré) sont assez bien reproduites, notamment en termes de distribution dans l'espace. Comparé aux CMIP3 MCG les plus récents, la moyenne saisonnière des précipitations semble être améliorée, en particulier lorsqu'elles sont reliées au forçage orographique (voir GUALDI *et al.* 2012 pour de plus amples détails).

Toutefois, des erreurs systématiques du modèle restent considérables, tant en termes de T2m et de précipitations (plus de détails peuvent être trouvés dans ULRICH *et al.* 2012 et GUALDI *et al.* 2012). Les modèles CIRCE sont généralement plus froids que les observations d'environ 2°C, alors qu'en termes de précipitations, ils ont tendance à surestimer les pluies en Europe centrale et à sous-estimer dans la région des Alpes.

## La mer Méditerranée

Les modèles CIRCE sont caractérisés par une structure réaliste de la TSM méditerranéenne (non illustré), tout spécialement en ce qui concerne ses gradients. Toutefois, tous les modèles sont affectés par un biais froid en ce qui concerne les observations.

La mise en place de CIRCE apparaît comme particulièrement bénéfique quand les bilans chaleur et masse sur le bassin sont évalués (non présenté). Pour tous les modèles, le bilan net de chaleur est négatif à la surface de la Méditerranée, indiquant une perte de chaleur à travers la surface, qui compense le gain de chaleur de l'Atlantique au détroit de Gibraltar. Ce comportement est en accord avec les observations et en

contraste avec la majorité des modèles ENSEMBLES.

En terme de bilan hydrologique (non présenté), les résultats CIRCE confirment le caractère d'évaporation du bassin méditerranéen, connu par les observations disponibles. La perte nette d'eau à travers la surface (spécialement dans la partie est du bassin) est compensée par une arrivée de masse nette d'eau depuis l'Atlantique à travers le détroit de Gibraltar.

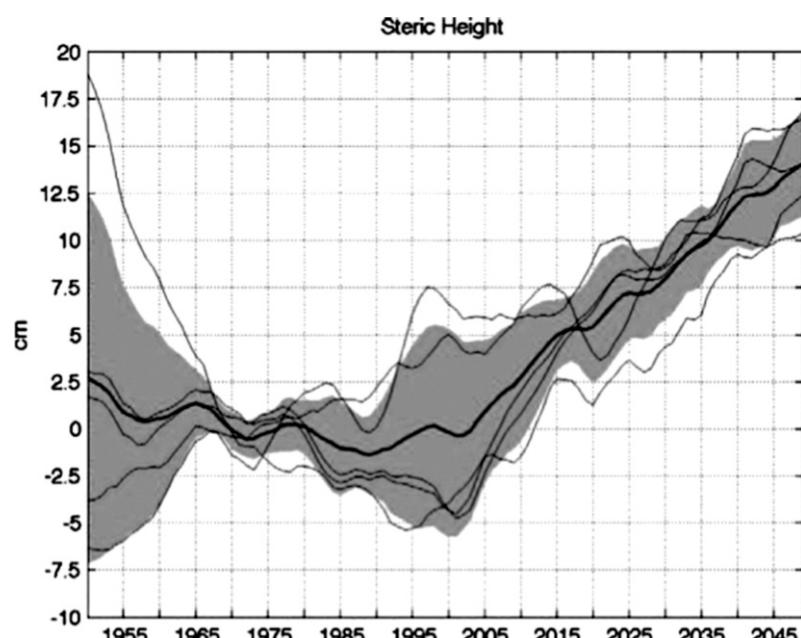
Plus de détails et des schémas peuvent être trouvés dans DUBOIS *et al.* (2012), GUALDI *et al.* (2012), GUALDI *et al.* (2013).

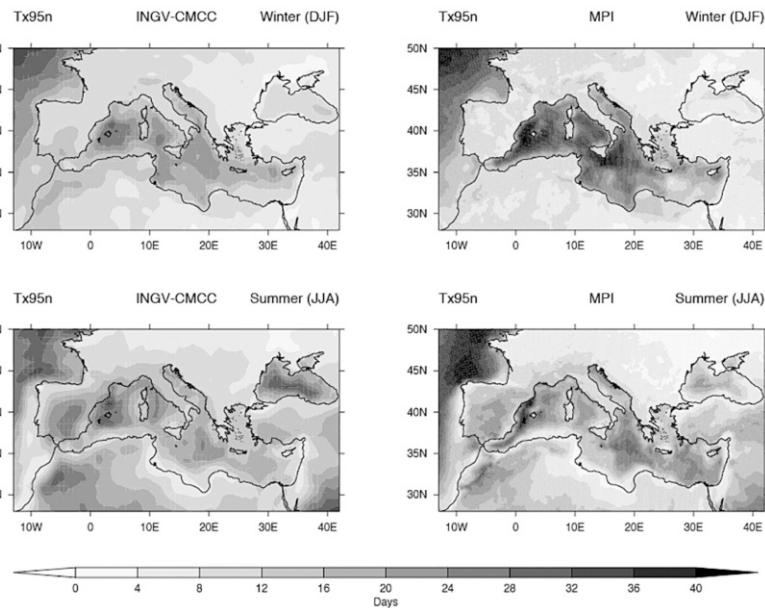
## Projections de scénarios futurs

Les projections futures sont évaluées pour le scénario A1B de l'IPCC. Tout spécialement, le signal du changement climatique est exprimé en terme de différence (ou différence en pourcentage, pour les précipitations) entre les valeurs moyennes sur la période future (2021-2050) et celles de la période de référence (1961-1990).

Les projections de modèle suggèrent une augmentation régulière de la température près de la surface (non présenté), couplée à une tendance positive de la TSM (à partir de la deuxième moitié des années 80, Cf. Fig. 1). Le changement dans les précipitations va

**Fig. 2 :**  
Idem figure 1, mais  
pour les composantes  
stériques du changement  
du niveau de la mer.  
(D'après Gualdi *et al.*  
2013)





**Fig. 3 :**

Changements dans le nombre de jours très chauds en hiver (cartes du haut) et en été (cartes du bas), issus des simulations CIRCE GCM (cartes de gauche) et CIRCE RCM (cartes de droite) du scénario A1B. (D'après Gualdi et al. 2012)

vers une réduction (environ – 5%, non présenté).

Le bilan hydrologique (non présenté) va évoluer vers une augmentation du caractère évaporatif du bassin méditerranéen, compensé par une arrivée d'eau de l'Atlantique plus consistante à Gibraltar.

La réponse projetée pour le bilan de chaleur (non illustré) montre, dans tous les modèles, une augmentation du gain de chaleur issu des ondes courtes (liées à la baisse de couverture nuageuse), une diminution de la perte de chaleur des ondes longues (hausse des radiations piégées dans l'atmosphère, due à l'effet de serre dominant l'augmentation des émanations de radiations en raison de la hausse des TSM), une diminution des pertes de chaleur sensibles (le gradient de température air-mer diminue) et une augmentation de la perte de chaleur latente (en raison de l'augmentation de l'évaporation). Le bilan moyen de chaleur simulé pour la période à venir est d'environ  $-0,8 \text{ W/m}^2$ , ce qui a conduit à l'affaiblissement du refroidissement de l'océan par l'atmosphère.

Tous les modèles CIRCE montrent des tendances positives du changement stérique du niveau de la mer (Cf. Fig. 2), avec une élévation du niveau de la mer sur allant de +6 à +12 cm en 2021-2050 comparé à 1961-1990.

Les changements de températures extrêmes ont été évalués en utilisant des indices statistiques. Le schéma 2 montre le changement climatique dans le nombre de journées extrêmement chaudes (avec  $T_{2m}$  dépassant le 95<sup>e</sup> percentile) dans deux modèles CIRCE : un MCG (INGV, panneaux gauche) et un MCR (MPI, sur la droite). Pour les zones terrestres, les augmentations les plus fortes en nombre de jours très chauds sont projetées en été et sur la péninsule ibérique. Les seuils de valeur du 95<sup>e</sup> centile pour la période de référence (1961-1990) sont cependant plus faibles sur terre que sur mer, et donc la plus grande augmentation de fréquence du nombre de jours très chauds apparaît au-dessus des zones marines. A l'augmentation de la fréquence des jours chauds s'ajoute l'augmentation du nombre de nuits très chaudes avec de plus longues périodes de chaleur et vagues de chaleur (non représenté). D'un autre côté, le nombre de jours très froids et de nuits très froides, ainsi que la durée des périodes de froid, sont projetées à la baisse (non présenté).

En ce qui concerne les événements de précipitations extrêmes (non représenté), dans la région sud méditerranéenne l'intensité de manifestations de précipitations est projetée à la baisse, en raison probablement de l'augmentation des températures, qui réduisent l'humidité des sols au printemps. En revanche, dans la région nord méditerranéenne, les résultats des modèles suggèrent une augmentation des manifestations de pluie torrentielles pendant toutes les saisons sauf en été, probablement car l'activité convective est améliorée. Ces changements ne sont pas forcément liés à des changements de circulation à grande échelle, à l'exception du sud-est de la Méditerranée, où, par contraste, au cours de toutes les saisons sauf en été, les changements projetés dans la circulation à grande échelle agiront vers la suppression de l'intensité des événements de précipitations extrêmes.

## Conclusions

Pour la première fois, l'évolution de certaines variables clés de la mer (p. ex. la TSM, le niveau de la mer, et les flux d'eau et de chaleur) a été obtenue en haute résolution

sur la mer Méditerranée et avec un degré élevé de cohérence physique, en raison d'interactions cohérentes des flux air-mer.

Comparé avec les simulations CMIP3, les modèles CIRCE montrent des améliorations dans la reproduction des moyennes saisonnières de T2m, de précipitations et de TSM. Néanmoins, les simulations CIRCE montrent encore des erreurs systématiques dans le T2m et les précipitations. De telles erreurs sont localement plus importantes que celles obtenues avec les modèles régionaux atmosphériques en haute résolution. (e.g., les modèles ENSEMBLES).

Les modèles CIRCE fournissent une estimation raisonnable du bilan hydrologique méditerranéen et en particulier du capital de chaleur en surface. Contrairement à la plupart des modèles ENSEMBLES, le bilan total de chaleur dans toutes les simulations CIRCE est négatif pour la période actuelle, avec des valeurs qui s'accordent avec les observations, satisfaisant le bilan de fermeture de chaleur contrôlé par le transport de chaleur à travers Gibraltar.

Les projections CIRCE indiquent que des changements importants dans le climat de la région méditerranéenne peuvent apparaître dès les premières décennies du scénario. Un réchauffement considérable (près de 1,5°C en hiver et de 2°C en été) et une diminution significative des précipitations (environ 5%) pourrait affecter la région dans la période 2021-2050, par rapport à la période de référence (1961-1990), dans un scénario d'émission A1B.

La surface prévue de perte nette de chaleur diminue dans la période future, conduisant à un refroidissement plus faible de la mer Méditerranée par l'atmosphère. En revanche, le bilan hydrologique semble augmenter dans les prochaines décennies, amenant la mer Méditerranée à perdre plus d'eau par la surface que dans le passé.

De plus, selon les projections CIRCE, le changement climatique pourrait produire une hausse moyenne stérique du niveau de la mer entre 2021-2050 de +6 à +12 cm, en se basant sur la période de référence.

Les résultats CIRCE sont précurseurs dans l'obtention de simulations physiques plus cohérentes pour la région méditerranéenne. Les nouveaux projets internationaux HyMeX (DROBINSKI et DUCROCQ, 2008) et MED-CORDEX (RUTI *et al.* 2011), actuellement en cours, continueront d'améliorer

l'approche couplée de CIRCE, avec l'apport de résolutions atmosphériques plus fines.

### A.S.

### Références

- Christensen, J. H., T. R. Carter, M. Rummukainen, and G. Amanatidis, 2007: Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project. *Climatic Change*, 81, 1–6.
- Christensen, J. H., M. Rummukainen, and G. Lenderink, 2009: Formulation of very-high-resolution regional climate model ensembles for Europe. ENSEMBLES: Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales, P. van der Linden and J. F. B. Mitchell, Eds., Met Office Hadley Centre Rep., 47–58.
- Drobinski P., and V. Ducrocq, 2008: Hydrological cycle in the Mediterranean EXperiment: Towards a major field experiment in 2010–2020. White Book. [Available online at [www.hymex.org/public/documents/WB\\_1.3.2.pdf](http://www.hymex.org/public/documents/WB_1.3.2.pdf)]
- Dubois, C., and Coauthors, 2012: Future projections of the surface heat and water budgets of the Mediterranean Sea in an ensemble of coupled atmosphere–ocean regional climate models. *Clim. Dyn.*, 39, 1859–1884, doi:10.1007/s00382-011-1261-4.
- Giorgi, F., 2006: Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, doi:10.1029/2006GL025734.
- Gualdi, S., and Coauthors, 2012: Future climate projections. Regional Assessment of the Climate Change in the Mediterranean: Air, Sea and Precipitation and Water, A. Navarra and L. Tubiana, Eds., Advances in Global Change Research, Vol. 50, Springer Verlag, 125.
- Gualdi S., S. Somot, L. Li, V. Artale, M. Adani, A. Bellucci, A. Braun, S. Calmant, A. Carillo, A. Dell'Aquila, M. Déqué, C. Dubois, A. Elizalde, A. Harzallah, D. Jacob, B. L'Hévéder, W. May, P. Oddo, P. Ruti, A. Sanna, G. Sannino, E. Scoccimarro, F. Sevault and A. Navarra, 2012: The CIRCE simulations: a new set of regional climate change projections performed with a realistic representation of the Mediterranean Sea, *BAMS*, 94, 65–81.
- Levitus, S., 1982: Climatological Atlas of the World Ocean. NOAA Prof. Paper 13, 173 pp. and 17 microfiche.
- Marcos, M., and M. N. Tsimplis, 2008: Comparison of results of AOGCMs in the Mediterranean Sea during the 21<sup>st</sup> century. *J. Geophys. Res.*, 113, C12028, doi:10.1029/2008JC004820.
- MEDAR Group, 2002: MEDATLAS 2002 Database: Cruise Inventory, Observed and Analyzed Data of Temperature and Bio-Chemical Parameters. IFREMER, 4 CD-ROMs.

Antonella SANNA  
CMCC  
Centre Euro-  
Méditerranéen  
sur les changements  
climatiques  
Viale Aldo Moro 44  
40127 Bologna  
Italie  
Tél. : +39 051 3782610  
Fax : +39 051 3782655  
Email :  
[Antonella.sanna@cmcc.it](mailto:Antonella.sanna@cmcc.it)

- Mitchell, T. D., and P. D. Jones, 2005: An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, 25, 693–712.
- Petrenz D., W. Large and N. Pinardi, 2010: On the corrections of ERA-40 surface flux products consistent with the Mediterranean heat and water budgets and the connection between basin surface total heat flux and NAO. *J. Geophys. Res.*, 115, C06022, doi:10.1029/2009JC005631.
- Sanchez-Gomez, E., S. Somot, and A. Mariotti, S. A. Josey, C. Dubois, N. Elguindi, and M. Déqué, 2011: Evaluation of the Mediterranean Sea water and heat budgets as simulated by an ensemble of high resolution regional climate models. *Climate Dyn.*, 37, 2067–2086, doi:10.1007/s00382-011-1012-6.
- Somot, S., F. Sevault, M. Déqué and M. Crépon, 2008: 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model. *Global Planet. Change*, 63, 112–126.
- Ruti, P., and Coauthors, 2011: MED-CORDEX initiative for Mediterranean climate studies. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 13, Abstract EGU2011-10715. [Available online at <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/EGU2011-10715.pdf>.]
- Ulbrich, U., and Coauthors, 2012: Past and current climate changes in the Mediterranean region. *Regional Assessment of the Climate Change in the Mediterranean: Air, Sea and Precipitation and Water*, A. Navarra and L. Tubiana, Eds., *Advances in Global Change Research*, Vol. 50, Springer Verlag, 125

## Résumé

---

Cet article résume les principaux résultats d'un projet financé par l'Union européenne, le projet CIRCE. L'objectif principal de CIRCE a été la recherche et l'analyse du climat méditerranéen actuel et dans les conditions du futur (scénario A1B), à travers des simulations numériques. De nombreux modèles climatiques, soit globaux soit régionaux, ont participé à CIRCE, avec comme caractéristique commune la présence d'un module à haute résolution pour la simulation réaliste de la dynamique en Méditerranée. Les résultats des modèles indiquent une représentation réaliste des structures de la température à 2 mètres et de la précipitation observées, malgré des biais non négligeables. Les flux de chaleur et masse sur la Méditerranée sont simulés de manière réaliste. Les projections de CIRCE pour le XXI<sup>e</sup> siècle indiquent que des changements climatiques importants vont se produire dans la région méditerranéenne et ses alentours, dès les prochaines décennies, avec une tendance vers un climat plus chaud et sec.

## Summary

---

This paper synthesizes the main results of a recently ended EU funded project: the CIRCE project. The main objective of this project was the investigation and analysis of the Mediterranean climate under present and future scenario (A1B) conditions, by means of numerical simulations. A plethora of climate models, ranging from global to regional, participated to CIRCE, with the common feature of an interactive high-resolution module, for the realistic simulation of the Mediterranean Sea dynamics. Model results show a realistic representation of the observed spatial patterns of the 2 meter-temperature and precipitation, despite quite substantial biases. Heat and mass fluxes over the Mediterranean basin are realistically simulated. The CIRCE projections for the twenty-first century suggest that remarkable changes in the climate of the Mediterranean region might occur already in the next few decades, with a tendency toward a warmer and dryer climate.