



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 721–727



Géophysique externe, climat et environnement (Climat)

L'évolution séculaire des températures de surface de la mer Méditerranée (1856–2000)

Vincent Moron

*UFR des sciences géographiques et de l'aménagement, université d'Aix-Marseille-1, 29, av. Robert-Schuman, 13261 Aix en Provence, France
& Cerege, UMR 6635 CNRS, Europôle méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545 Aix en Provence, France*

Reçu le 5 décembre 2002 ; accepté le 21 juillet 2003

Présenté par Michel Petit

Résumé

La variabilité à long terme des températures de surface océanique de la mer Méditerranée est analysée sur la période 1856–2000. L'évolution régionale moyenne, représentée par le premier vecteur propre (représentant plus de 45% de la covariance totale) montre qu'il n'y a pas de tendance linéaire claire sur l'ensemble de la période, mais plutôt une superposition d'une oscillation irrégulière dominante (période apparente de 60–70 ans et amplitude moyenne de 0,4 à 0,5 °C) et d'une hausse très faible (équivalente à une augmentation de la température de 0,1 °C par siècle). La dernière période chaude, qui est plus intense à l'ouest qu'à l'est du bassin, n'est pas plus chaude que la période 1935–1945 ou que les années 1960. La comparaison avec l'évolution moyenne de l'hémisphère nord montre une bonne concordance, avec, toutefois, une moins forte contribution de la hausse générale dans le bassin méditerranéen. **Pour citer cet article :** V. Moron, C. R. Geoscience 335 (2003).

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Long-term variability of the Mediterranean Sea surface temperature (1856–2000). The mean sea surface temperature anomalies (SSTA) of the Mediterranean Sea during the past 150 years (1856–2000) are analysed. The first empirical orthogonal function (EOF) of the covariance matrix of the SSTA explains more than 45% of the variance, suggesting that the temporal variation of the Mediterranean Sea is largely in phase over the whole basin. The mean variability of Mediterranean SSTA from 1856 to 2000 superposes a main irregular oscillation (period of 60–70 years and mean amplitude of 0.4–0.5 °C) and a weak long-term positive trend (equivalent to an increase of +0.1 °C per century). The last warm phase, which is strongest in the western basin, is not warmer than the decade 1935–1945 or the ending part of the 1960s. The mean temporal evolution of the North Hemisphere is close to the variation of the Mediterranean Sea, except that the long-term increase is more intense in the North Hemisphere. **To cite this article:** V. Moron, C. R. Geoscience 335 (2003).

© 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : température de surface océanique ; mer Méditerranée ; variabilité à long terme

Keywords: sea surface temperature; Mediterranean Sea; long-term variability

Adresse e-mail : moron@cerege.fr (V. Moron).

1631-0713/\$ – see front matter © 2003 Académie des sciences. Publié par Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

doi:10.1016/S1631-0713(03)00128-7

Abridged English version

The long-term variability of the sea surface temperature (SST) of the Mediterranean sea (MED) is analysed from 1856 to 2000. Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis is used to identify the leading pattern of simultaneous variation of the standardized monthly SSTA extracted from two different dataset; the *Global Ocean Sea Temperature Atlas* elaborated by the Hadley Centre (SST-H hereafter) [15] with an horizontal resolution of $1^\circ \times 1^\circ$ and the 'optimal' dataset of Kaplan and co-workers [9] (SST-K hereafter) with an horizontal resolution of $5^\circ \times 5^\circ$. The SSTA are firstly standardized to zero mean and unit variance at monthly time scale. The first EOF of the standardized monthly SSTA represents 46.9% (SST-H) and 45.4% (SST-K) of the total covariance. The pattern of this leading EOF has the same sign across MED (Fig. 1a and b) and summarizes quite accurately the mean variation of MED SSTA. This unrotated EOF is not necessarily a mode of variation of MED, but describes quite accurately the mean evolution of the MED SSTA. The correlation between the EOF time coefficients of SST-H and SST-K equals 0.85 on the common period (Fig. 2a). Note also that the correlation between these EOFs time coefficients and the respective average of the centred and/or standardized MED SSTA is always over 0.97. The long-term variability is extracted from the EOF time coefficients by a singular spectrum analysis [14,20] with a window of 120 months. Note that the long-term variability shown in Fig. 2b is almost unchanged when the length of the window varies between 60 and 120 months. Two components seem to be superimposed: (i) an irregular oscillation with a period of 60–70 years (i.e. maxima for the leading EOF of SST-K in 1875–1880, 1935–1945, 1995–2000 and minima near 1860, 1905–1910 and 1975–1980; see Fig. 2b) and (ii) a weak increasing trend (equivalent to a linear increase of 0.1°C per century). The long-term variability of both leading EOF time coefficients is quite consistent with the one of the North Hemisphere's average [7], but the contribution of the irregular oscillation (increasing trend) is weaker (stronger) for the North Hemispheric index than for the leading EOF of the MED SSTA (Fig. 2b). The mean SSTA for four periods (1901–1914, 1936–1948, 1973–1978, 1987–1996) demonstrate that the long-term variability is in-phase for the whole MED,

with the exception of the last warming phase (beginning from approximately 1980), which is more intense in the western basin than in the Levantine basin (Fig. 3).

1. Introduction

Le contexte général de la variation climatique au cours du XX^e siècle est la hausse des températures de surface [5,7,14]. La hausse de la température moyenne planétaire depuis la fin du XIX^e siècle est estimée à $+0,6^\circ\text{C}$ ($\pm 0,2^\circ\text{C}$), avec une période anormalement froide limitée à l'hémisphère nord de 1946 à 1975 environ [5,7,14]. La hausse récente de la fin du XX^e siècle (depuis 1976) est approximativement synchronisée entre les deux hémisphères, avec une amplitude plus importante dans l'hémisphère nord [5]. En première approximation, à part la possibilité de stockage ou de déstockage de chaleur par les océans, la variation de la température moyenne à la surface du globe doit être forcée par la modification du bilan radiatif planétaire. Une partie de la hausse contemporaine semble être notamment associée à l'augmentation des gaz à effet de serre, en relation avec l'utilisation des combustibles fossiles [18]. Des simulations numériques intégrant les forçages naturels (= constante solaire et volcanisme) sont ainsi incapables de reproduire correctement la dernière phase de hausse thermique, depuis approximativement 1975 [2,18].

À l'échelle régionale, les variations de la température ne sont pas seulement liées aux changements du bilan radiatif, mais aussi aux modifications des circulations océanique et atmosphérique. Cette note s'intéresse plus particulièrement à l'évolution d'ensemble des températures de surface océanique (TSO) de la mer Méditerranée [1]. De nombreuses études ont analysé les variations thermiques des continents bordiers [4,8,11,13,19]. Ces études concluent à une hausse thermique sur le XX^e siècle, avec, cependant, une forte modulation saisonnière et diurne ainsi qu'une différence entre les stations qui se sont urbanisées et celles qui sont restées dans un milieu rural [4,19]. L'avantage des données de TSO sur les données continentales est l'absence du biais lié à l'urbanisation, même si d'autres biais existent en relation avec les changements des pratiques instrumentales [15]. L'évolution des TSO de la mer Méditerranée

née est ici réévaluée sur une longue période (1856–2000) en confrontant les résultats obtenus avec deux fichiers différents : le fichier distribué par l'office météorologique britannique [15] (TSO-H) et un fichier élaboré par Kaplan et al. [9] (TSO-K), basé sur une reconstruction linéaire des données grâce à des analyses en composantes principales (ACP). La Section 2 présente brièvement les deux ensembles de données. La Section 3 analyse l'évolution lente des TSO méditerranéennes. Une conclusion (Section 4) clôt cette note.

2. Données

Le premier fichier utilisé (TSO-H) est le *Global Ocean Surface Temperature Atlas* (version 8) distribué par l'office météorologique britannique [15]. Ce fichier est issu des recherches menées depuis près de 20 ans par cet organisme. Les données TSO ont été compilées et surtout corrigées des biais instrumentaux liés aux changements des instruments de mesure des TSO, notamment de part et d'autre de 1941. La version utilisée a une résolution de $1^\circ \times 1^\circ$ et est disponible sur la période 1901–1996.

Le fichier «KAPLAN» (TSO-K) a été obtenu par une reconstruction des champs de TSO via des ACP [9]. Cette technique garantit une couverture spatiale et temporelle excellente, car la matrice de covariance à l'origine de l'ACP ne nécessite pas obligatoirement une couverture temporelle continue. Les champs peuvent être reconstruits à partir des structures spatiales obtenues avec beaucoup de points, mais peu d'observations. En revanche, la résolution est basse ($5^\circ \times 5^\circ$), et les secteurs où les gradients thermiques sont importants sont, sans doute, mal pris en compte. La technique utilisée exerce un lissage spatio-temporel de l'information brute. Même si les deux fichiers proviennent au départ de données semblables, il semble intéressant de les comparer sur un espace relativement petit par rapport à l'échelle planétaire.

Les données de TSO ont été d'abord centrées à l'échelle mensuelle. L'ACP a été réalisée sur des données standardisées (c'est-à-dire que les anomalies centrées ont été divisées par l'écart type mensuel), afin de donner le même poids à l'ensemble des points, indépendamment de leur variance initiale.

3. Résultats

Le premier vecteur propre de l'ACP des anomalies standardisées de TSO mensuelles présente une structure spatiale très proche dans les deux fichiers, avec des saturations partout positives et maximales au centre du bassin, à proximité du détroit de Sicile (Fig. 1). Cette disposition est parfaitement en accord avec les résultats théoriques [16] : le premier vecteur propre d'un champ relativement homogène correspond à un « effet de masse », avec des poids maximaux sur le centre du domaine géographique, car ce dernier minimise la distance par rapport aux autres points. La variance expliquée dépasse 45% dans les deux cas (46,9% pour TSO-H et 45,4% pour TSO-K). La variabilité thermique de la mer Méditerranée se fait donc largement en phase sur l'ensemble du bassin. Précisons que ce premier vecteur propre est simplement utilisé ici comme un résumé de l'information totale et pas comme la trace spatiale d'un quelconque mode de variation naturel ou forcé des TSO du Bassin méditerranéen.

L'évolution temporelle (Fig. 2a) montre une excellente correspondance entre les deux séries (corrélation = 0,85 sur les 1152 mois communs, de janvier 1901 à décembre 1996). Notons que les corrélations entre la simple moyenne arithmétique des anomalies de TSO centrées ou standardisées de l'ensemble de la mer Méditerranée et ces séries sont toujours supérieures à 0,97 dans les deux fichiers. L'évolution la plus lente des composantes principales est extraite grâce à une analyse en spectres singuliers [14,20]. Cette technique correspond à une ACP réalisée sur une matrice constituée de la série temporelle copiée et décalée un certain nombre de fois. Les séries filtrées, correspondant au premier vecteur propre de l'analyse en spectres singuliers (Fig. 2b) sont de nouveau très proches (corrélation = 0,9) et expliquent 14,4% (TSO-K) à 18,8% (TSO-H) de la variance totale. Un cycle irrégulier de période 60–70 ans (par exemple : maxima vers 1875–1880, 1935–1945 puis vers 2000 et minima vers 1860, 1905–1910, 1975–1980 dans le fichier TSO-K) semble se superposer avec une hausse faible de 1856 à 2000. Il est bien évidemment impossible de tester la signification du cycle irrégulier. Les deux composantes (oscillation irrégulière et tendance croissante) semblent se retrouver dans l'indice thermique moyen de l'hémisphère

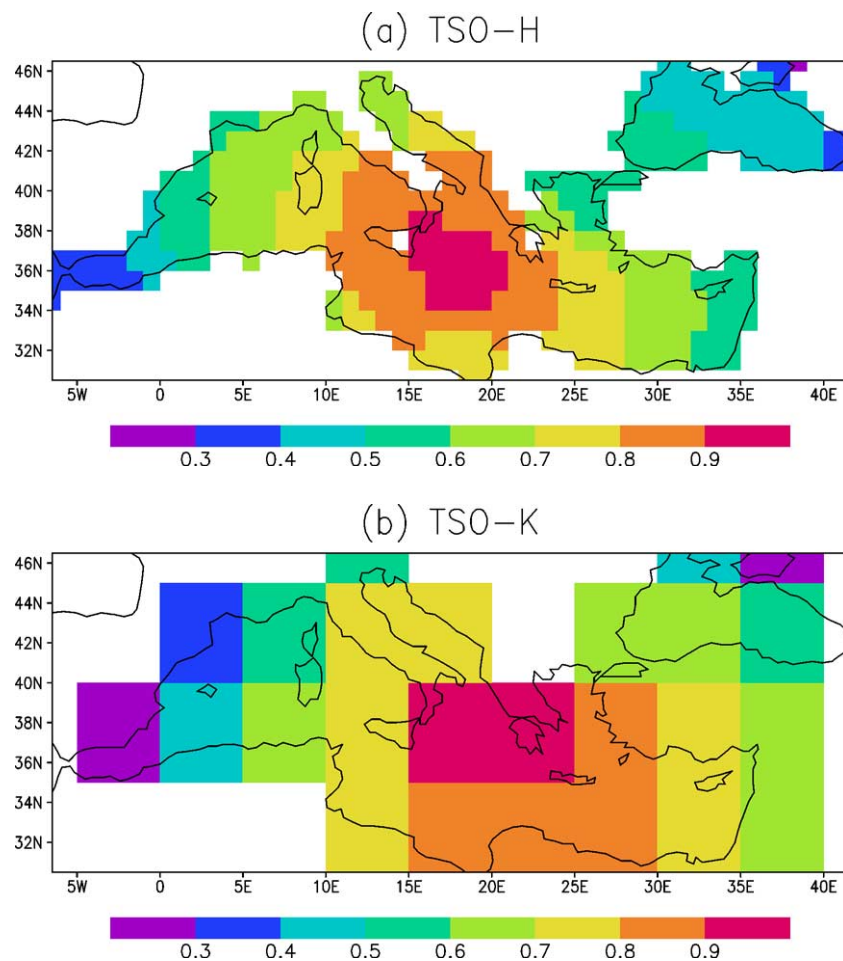


Fig. 1. Premier vecteur propre des anomalies standardisées de TSO de la mer Méditerranée issu du fichier de l'office météorologique britannique (a) et du fichier KAPLAN (b). Les valeurs représentent les saturations (= corrélations entre les anomalies de chaque point et le score temporel du premier vecteur propre).

Fig. 1. Leading empirical orthogonal function (EOF) of the standardized sea surface temperature anomalies of the Mediterranean Sea from the Met Office dataset (a) and from the KAPLAN dataset (b). The values are correlations between the leading EOF time coefficients and the standardized sea-surface anomalies.

nord [7] (Fig. 2b). De même, les variations lentes de ce dernier sont globalement en phase avec celles constatées préalablement dans le Bassin méditerranéen (Fig. 2b). En revanche, le réchauffement contemporain, débutant vers 1972–1975 (indice thermique nord-hémisphérique) et vers 1978–1980 (Bassin méditerranéen) est beaucoup plus intense pour l'indice nord-hémisphérique (Fig. 2b).

La trace spatiale de la variabilité à long terme des TSO méditerranéennes a été reconstruite en calcu-

lant les anomalies de température (fichier TSO-H) sur quatre périodes caractéristiques (Fig. 2b). Les trois premières périodes révèlent une évolution nettement en phase de l'ensemble du bassin, avec des nuances locales. Ainsi la première période (1901–1914) révèle des anomalies froides ($-0,2$ à $-0,7$ °C par rapport à la moyenne 1901–1996), plus marquées dans la partie occidentale (Fig. 3a). Le réchauffement des années 1920 aboutit à une période anormalement chaude ($+0,2$ à $+0,7$ °C par rapport à la moyenne 1901–

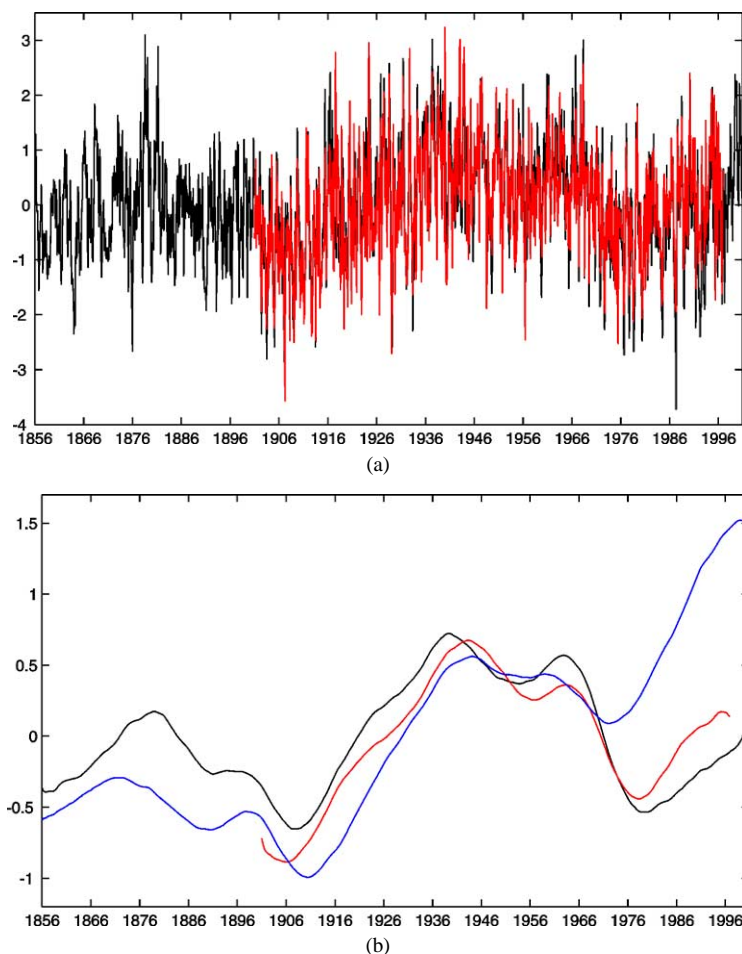


Fig. 2. (a) Score temporel du premier vecteur propre des anomalies standardisées de TSO de la mer Méditerranée, issu du fichier TSO-H (en rouge) et du fichier TSO-K (en noir). Les séries ont été standardisées ; (b) idem que (a) pour les séries temporelles filtrées par une analyse en spectres singuliers. La composante lente de l'anomalie thermique moyenne de l'hémisphère nord [7], a été ajoutée (en bleu).

Fig. 2. (a) Leading EOF time coefficients of the standardized MED SSTA from TSO-H dataset (in red) and from the TSO-K dataset (in black); (b) same as (a) for the filtered time series obtained through a singular spectrum analysis. The slow component of the North Hemisphere's average temperature [7], is also displayed in blue.

1996), plus intense sur l'Est du bassin, de la mer Ionienne à la mer Noire (Fig. 3b). La dernière phase froide (de $-0,2$ à $-0,6$ °C par rapport à la moyenne 1901–1996) est assez homogène, avec toutefois des anomalies maximales de la Mer Egée à la Mer Noire (Fig. 3c). La phase chaude contemporaine est finalement la moins homogène, avec une hausse marquée de $+0,5$ à $+0,7$ °C dans la mer d'Alboran et autour des Baléares par rapport à la phase précédente, et une hausse beaucoup plus faible sur le Bassin levantin (Fig. 3d).

4. Discussion et conclusion

La variation générale des TSO de la mer Méditerranée est représentée par le premier vecteur propre de la matrice de covariance des anomalies mensuelles standardisées. Sur la période 1900–1996, on constate une hausse de la température de près de 1 °C sur la partie occidentale de la mer Méditerranée, et comprise entre $+0,2$ (Bassin levantin) et $+0,8$ °C par ailleurs. La prise en compte de la période la plus longue (1856–2000) minimise largement cette tendance croissante,

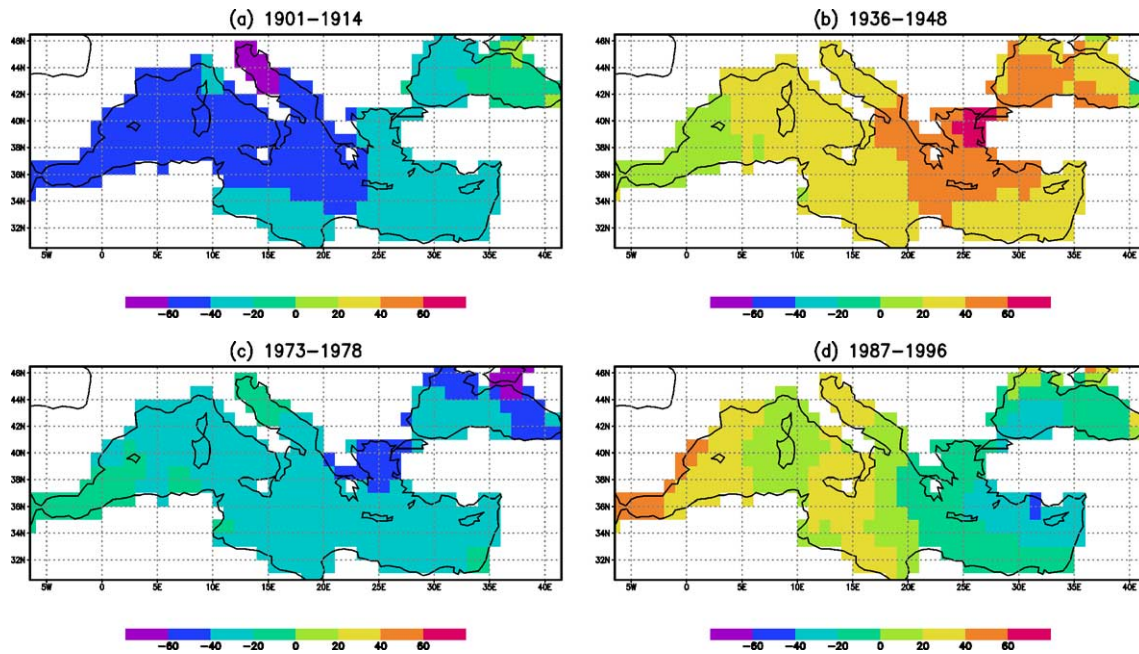


Fig. 3. Anomalies thermiques moyennes (en $1/10^{\circ}$ de degrés Celsius relativement à la moyenne 1901–1996) en (a) 1901–1914 ; (b) 1936–1948 (c) 1973–1978 ; (d) 1987–1996.

Fig. 3. Mean SSTA (in $1/10^{\text{th}}$ of $^{\circ}\text{C}$ relatively to the long-term mean) in (a) 1901–1914; (b) 1936–1948; (c) 1973–1978; (d) 1987–1996.

en raison de la présence d'une phase anormalement chaude, par rapport à la moyenne à long terme, entre 1870 et 1885 (Fig. 2c). Une variation irrégulière, d'une période de 60–70 ans [17], apparaît en fait plus importante que la tendance à long terme, avec des variations qui peuvent atteindre $0,3$ à $0,6^{\circ}\text{C}$ en une quinzaine d'années (cf., par exemple, la différence entre la moyenne 1987–1996 (Fig. 3c) et la moyenne 1973–1978 (Fig. 3c) sur la moitié occidentale du Bassin méditerranéen). Si on considère la moyenne des anomalies de TSO centrées, cette oscillation a une amplitude moyenne de $0,4$ – $0,5^{\circ}\text{C}$ environ. Le réchauffement contemporain (depuis 1978–1980) est nettement plus intense sur l'Ouest du bassin que sur l'Est [1].

L'évolution des TSO de la mer Méditerranée dépend non seulement des variations du bilan radiatif planétaire, mais aussi des variations de stockage de chaleur dans la colonne d'eau et celles des échanges avec l'Atlantique nord via le détroit de Gibraltar [3], ainsi que les changements des conditions atmosphériques au-dessus du Bassin méditerranéen, ces différentes causes n'étant pas obligatoirement indépendantes les unes des autres. La similarité entre l'évolution lente des températures méditerranéennes et celle

de la totalité de l'hémisphère nord suggère une origine dominante d'échelle globale. Ainsi, la première phase de hausse des températures entre 1910 et 1935–1940 a-t-elle été reliée à l'augmentation de la constante solaire et à la diminution de l'activité volcanique [2,18]. La seconde hausse, à partir de 1970–1975, est plutôt associée à une réponse à l'augmentation des gaz à effet de serre, ainsi qu'à une augmentation de la constante solaire [2,18]. D'autres facteurs doivent bien entendu rentrer en ligne de compte, comme l'influence de la circulation atmosphérique. L'Oscillation nord-atlantique (ONA), qui est définie comme l'évolution en opposition de phase entre les anomalies barométriques de la dépression d'Islande et celles de l'anticyclone des Açores, est le premier mode de variation atmosphérique de l'espace atlantico-européen [12]; or l'ONA, en tout cas hivernale, est corrélée négativement avec les températures méditerranéennes au sud d'une ligne entre Gibraltar et le Sud de l'Italie (cf. la Fig. 7 de [12]). La phase chaude du milieu du XX^{e} siècle correspond ainsi assez bien à une ONA affaiblie, alors que le refroidissement brutal des années 1965–1975 est approximativement synchrone du ren-

forcement de l'ONA. L'ONA hivernale depuis 1980 est constamment positive, sauf à de rares exceptions (comme en 1995–1996) et cela peut atténuer, au moins partiellement, la hausse des températures méditerranéennes, notamment sur le Bassin levantin (Fig. 3d).

Si les TSO méditerranéennes sont causées par divers mécanismes climatiques, elles sont aussi susceptibles de rétroagir sur d'autres paramètres atmosphériques, mais aussi océaniques, via la participation des eaux méditerranéennes à la circulation thermohaline [3]. Sur les conséquences atmosphériques, Garrett et al. [6] ont montré que la tension de vapeur à l'interface océan-atmosphère était nettement plus élevée en 1960–1970 que durant la décennie suivante (cf. la Fig. 8 de [6]). Cette évolution correspond à la forte baisse de la température constatée ici. Cela semble indiquer que les années 1960, plus chaudes, augmentent le flux de chaleur latente en direction de l'atmosphère, alors que les années 1970, plus froides, sont associées à une diminution de ce flux. Les conséquences sur les précipitations restent à évaluer et nécessitent sans doute une étude saisonnière plus fine. À propos des relations entre les TSO, les eaux profondes et la circulation thermohaline, Béthoux et al. [3] constatent plutôt une hausse régulière de la température des eaux méditerranéennes (bassin occidental) profondes depuis 1940. Cette hausse est estimée à 0,15 °C entre 1959 et 1997. Ces auteurs ne constatent pas, en particulier, de baisse notable vers 1970 (cf. la Fig. 1a de [3]), mais la durée de cet événement, somme toute assez brève, l'empêche peut-être d'être enregistré en profondeur. Il est cependant curieux de constater que Levitus et al. [10] montrent une baisse des températures, à 1750 m de profondeur, juste au débouché de la mer Méditerranée, de la pentade 1970–1974 par rapport à la pentade 1955–1959 (cf. Fig. 2a de [10]). Or, ce signal est en phase avec ce que l'on constate en surface. Il reste donc encore beaucoup à faire dans l'analyse des relations entre les variations observées en surface et celles en profondeur.

Références

- [1] A. Bartzokas, D.A. Metaxas, I.S. Ganas, Spatial and temporal sea surface temperature covariances in the Mediterranean, *Int. J. Climatol.* 14 (1994) 201–214.
- [2] C. Bertrand, J.-P. van Ypersele, A. Berger, Volcanic and solar impacts on climate since 1700, *Clim. Dynam.* 15 (1999) 355–367.
- [3] J.-P. Béthoux, B. Gentili, D. Taillez, Warming and freshwater budget change in the Mediterranean since the 1940s, their possible relation to the greenhouse effect, *Geophys. Res. Lett.* 25 (1998) 1023–1026.
- [4] M.J. Esteban-Parra, F.S. Rodrigo, Temperature trends and change points in the northern Spanish Plateau during the last 100 years, *Int. J. Climatol.* 15 (1995) 1031–1042.
- [5] C.K. Folland, T.R. Karl, J.R. Christy, R.A. Clarke, G.V. Gruza, J. Jouzel, M.E. Mann, J. Oerlemans, M.J. Salinger, S.W. Wang, Observed climate variability and change, in: R.T. Watson (Ed.), *Climatic Change 2001*, Cambridge University Press, 2001, pp. 99–181.
- [6] C. Garrett, R. Outerbridge, K. Thompson, Interannual variability in Mediterranean heat and buoyancy fluxes, *J. Clim.* 6 (1993) 900–910.
- [7] P.D. Jones, M. New, D.E. Parker, S. Martin, I.G. Rigor, Surface air temperature and its change over the past 150 years, *Rev. Geophys.* 37 (1999) 173–199.
- [8] M. Kadioglu, Trends in surface air temperature data over Turkey, *Int. J. Climatol.* 17 (1997) 511–520.
- [9] A. Kaplan, M.A. Cane, Y. Kushnir, A.C. Clement, M.B. Blumenthal, B. Rajagopalan, Analyses of global sea surface temperature 1856–1991, *J. Geophys. Res.* 103 (1998) 18567–18589.
- [10] S. Levitus, J.I. Antonov, T.P. Boyer, C. Stephens, Warming of the world ocean, *Science* 287 (2000) 2225–2229.
- [11] P. Maheras, H. Kutiel, Spatial and temporal variations in temperature regime in the Mediterranean and their relationship with circulation during the last century, *Int. J. Climatol.* 19 (1999) 745–764.
- [12] J. Marshall, Y. Kushnir, D. Battisti, P. Chang, A. Czaja, R. Dickson, J. Hurrell, M. McCartney, R. Saranavan, M. Visbeck, North Atlantic climate variability: phenomena, impacts and mechanisms, *Int. J. Climatol.* 21 (2001) 1863–1898.
- [13] D.A. Metaxas, A. Bartzokas, A. Visas, Temperature fluctuations in the Mediterranean area during the last 120 years, *Int. J. Climatol.* 11 (1991) 897–908.
- [14] V. Moron, R. Vautard, M. Ghil, Trend, decadal and interannual variability of the global sea surface temperatures (1900–1994), *Clim. Dynam.* 14 (1998) 545–569.
- [15] D.E. Parker, P.D. Jones, A. Bevan, C.K. Folland, Interdecadal changes of surface temperature since the nineteenth century, *J. Geophys. Res.* 99 (1994) 14373–14399.
- [16] M. Richman, Rotation of principal components, *J. Climatol.* 6 (1986) 293–335.
- [17] M.E. Schlesinger, N. Ramankutty, An oscillation in the global climate system of period 65–70 years, *Nature* 367 (1994) 723–726.
- [18] P.A. Stott, S.F.B. Tett, G.S. Jones, M.R. Allen, J.F.B. Mitchell, G.J. Jenkins, External control of 20th-century temperature by natural and anthropogenic forcings, *Science* 290 (2000) 2133–2137.
- [19] M. Turkes, U.M. Sümer, I. Demir, Re-evaluation of trends and changes in mean, maximum and minimum temperatures of Turkey for the period 1929–1999, *Int. J. Climatol.* 22 (2002) 947–978.
- [20] R. Vautard, M. Ghil, P. Yiou, SSA, a toolkit for short noisy chaotic time series, *Physica D* 58 (1992) 95–126.