

Océanographie
Série du marégraphe de Marseille : mesures de températures
de surface de la mer de 1885 à 1967

Jean-Claude Romano^{a,1,*}, Marie-Catherine Lugrezi^b

^a UMR-CNRS 6540 Dimar, station marine d'Endoume, rue Batterie-des-Lions, 13007 Marseille, France

^b UMS-CNRS 2196, station marine d'Endoume, rue Batterie-des-Lions, 13007 Marseille, France

Reçu le 20 juin 2006 ; accepté après révision le 27 septembre 2006

Disponible sur Internet le 30 janvier 2007

Présenté par Lucien Laubier

Résumé

De 1885 à 1967, la température de l'eau de mer a été quotidiennement mesurée à Marseille. Ces mesures servaient à corriger les enregistrements du marégraphe totalisateur utilisé comme référence au nivellement national. Ces mesures (près de 30 000) sont conservées sous forme manuscrites à l'Institut géographique national, où nous les avons retranscrites et enregistrées sous forme de fichiers informatiques. L'étude de cette longue série de températures, souvent évoquée, mais non examinée jusqu'à ce jour dans son intégralité, pouvait être très utile, compte tenu des préoccupations actuelles sur le changement climatique et de la rareté de telles archives historiques pour le milieu marin. Par comparaison avec d'autres séries pluriannuelles récentes de température de l'air et d'eau de mer de surface, il apparaît que les minima hivernaux sont respectivement trop faibles, de 2 °C en moyenne, que ceux des eaux méditerranéennes, mais trop élevés par rapport à ceux actuels de l'air pour la région. Ce biais est consécutif au lieu où étaient vraisemblablement réalisées ces mesures de température : le puits du flotteur du marégraphe, c'est-à-dire en eau de mer confinée et non libre. Mais le fait que toutes ces données aient été acquises selon le même protocole pendant 83 ans autorise leur comparaison au cours du temps. Cette comparaison fait apparaître une tendance au réchauffement de l'ordre de 0,66 °C en 100 ans pour les moyennes annuelles et de 0,76 °C pour les mois les plus chauds (juin à septembre). *Pour citer cet article : J.-C. Romano, M.-C. Lugrezi, C. R. Geoscience 339 (2007).*

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Marseilles tide-recorder series: sea-surface temperature measurements from 1885 to 1967. From 1885 to 1967, seawater temperatures have been daily measured at Marseilles. These measurements were used to correct the sea level data of tide-recorder that provided the zero level taken as a reference in France. These data (almost 30 000) are deposited within the National Geographic Institute, where we have manually copied and put them under a digital form. The complete treatment of this well-known but never examined long-time series should provide valuable information inside the context of the global warming and with regards to the lack of historical information on seawater temperature. By comparisons with current Mediterranean surface seawater- and air-temperature series, minima winter averages appear to be too low (about 2 °C) for the Mediterranean Sea's surface, and too high for aerial temperatures. This bias is probably the consequence of the measuring place, which is located inside the float shaft of the tide-recorder, i.e. in an enclosed and not free seawater body. But all the data having been recorded following the same protocol, they

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail: romano@univ-corse.fr (J.-C. Romano).

¹ Adresse actuelle : UMR CNRS 6134, centre scientifique de Vignola, route des Sanguinaires, 20000 Ajaccio, France

can be compared. The statistical treatment of this 83-year series exhibits a significant warming trend, which can be estimated to $+0.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ by a century, and $+0.76\text{ }^{\circ}\text{C}$ when only the warmest months (June to September) are taken into account. **To cite this article:** J.-C. Romano, M.-C. Lugezi, C. R. Geoscience 339 (2007).

© 2006 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Température de surface de la mer ; Séries à long terme ; Méditerranée nord-occidentale ; Réchauffement climatique ; Marégraphe de Marseille

Keywords: Sea-surface temperature; Long-time series; Northwestern Mediterranean; Global warming; Marseilles tide-recorder

Abridged English version

From 1885 to 1967, the sea-surface temperatures have been daily measured (12 h local time) in the Gulf of Marseilles (France). These measurements were conducted manually by successive competent operators and used in order to correct the sea-level data from the tide-recorder that provided the zero level taken as a reference in France. These complete datasets can be considered as the older long-time series of northwestern Mediterranean seawater temperatures. The series was known inside the French oceanographic community, but has been never treated before in its integrality for another purpose than as a corrective factor. In the context of the global warming and in front of the lack of historical data on temperature of Mediterranean coastal waters, its reconstitution should provide valuable background information about the rhythm and specific response of marine waters to the climate forcing. The series is deposited under the form of original ten-year volumes (one page per month) at the National Geographic Institute (Paris), where we have transcribed, type-written, and put under a digital form all the daily temperature data (almost 30 000). Few of them were absent or evidently wrong, but for reasons that are explained in the text, the January, February and December data since 1893 to 1913 (italics in Table 1) had to be discarded in the statistical treatments. No explicit protocol of seawater temperature measurement was found in the IGN archives, but we are reasonably certain that it remained unchanged. Our data analysis led us to estimate the employed thermometer's resolution at $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$.

The series is summarized here (Table 1) by the presentation of annual mean, standard-deviation, minima, and maxima values. The lowest annual seawater temperature ($16.06\text{ }^{\circ}\text{C}$) is encountered in 1956 as expected (the coldest winter in Europe during the 20th century), then in 1887, 1888, 1890, and 1891 (with 16.37 , 16.54 , 16.60 , and $16.64\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively). The warmest year is 1893 ($18.97\text{ }^{\circ}\text{C}$) then, in decreasing order, 1933, 1943, 1928, 1920 (18.74 , 18.70 , 18.47 , and $18.43\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively). In most cases, the annual

minima correspond to February and January (monthly averages not presented here) and the warmest months are July and August, a seasonal evolution that corresponds to the present-day situation.

But some discrepancies in coldest values also appeared at the first glance and were confirmed by comparisons with both actual Mediterranean surface seawater- and air-temperature series (Fig. 1). On one side, the minimal winter averages are too low (about $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$) for classically reported northwestern Mediterranean sea surface, and, on the other, too high for air-temperature normality in the region. After investigations, we have concluded that this bias is probably the consequence of the location of the seawater temperatures' measurement site. It was probably located inside the shaft containing the float of the tide-recorder, a hole of about 1 m in diameter that opens in the floor of the rocky basement of the building. The shaft is in communication with the sea by a narrow canal, i.e. it is an enclosed and not free seawater body. But taking into account that all the data have been recorded, at the same place, following the same protocol, we have considered that this series was coherent, which allowed us to examine the evolution of sea-surface temperatures along almost one century.

When the series is clustered (Fig. 1) between two periods (1885–1925 and 1926–1965), the June to October mean values are significantly lower inside the first group than in the second one: $22.69\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sd = 2.66; $n = 205$) compared to $23.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sd = 2.63; $n = 210$). This average difference ($+0.60\text{ }^{\circ}\text{C}$) is highly significant at $p < 0.001$ and the risk of H_0 reject decreases at very low values ($p < 10^{-6}$) when the comparisons concern the same June–October period mean values, but after the subtraction, for each month, of the monthly average over the considered period. This warning trend concerns mainly the warmest months. For March-to-May and November periods, the mean values are respectively $15.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the 1885–1925 period and $15.79\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 1926–1967. This $+0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ increase is significant at the $p_{0.05}$ level, neither by the comparisons of monthly mean values, nor when they are corrected by the climatic averages.

This difference is representative of a regular evolution of sea-surface temperatures. On an annual mean value basis (Fig. 2, April to November only, see above), this 83-year series draws also a significant warming trend ($r = 0.215$; $n = 83$; $p < 0.05$), which can be estimated to $+ 0.66$ °C by a century, and to $+ 0.76$ °C when only the warmest months (June to September) are taken into account.

The exhaustive consideration of this historical long-time series of daily seawater temperatures has shown its limits, but also its qualities. The marine long-time series are sufficiently scarce, particularly in coastal waters, in order to consider that this series must be integrated in the batch of information concerning the seawater evolution under the climate forcing.

1. Introduction

La reconstitution de données historiques de température est un élément important pour estimer à l'échelle locale l'évolution climatique actuelle et future sous l'influence du forçage anthropique. Pour les eaux marines, dont on sait qu'elles n'ont pas le même rythme d'évolution que les surfaces continentales [5], cette reconstitution est rendue difficile car les premières mesures hydrologiques ne datent que de la seconde moitié du XIX^e siècle. Encore ne s'agit-il alors le plus souvent que de mesures ponctuelles dans le temps et non de séries chronologiques. Les archives existantes en sont d'autant plus précieuses.

L'existence d'une série presque centennale de températures pour les eaux de surface du golfe de Marseille était connue et présentait donc un grand intérêt. Cette série était associée au fonctionnement du marégraphe de Marseille. Ce marégraphe enregistreur et totalisateur a fourni le niveau « zéro » de référence pour les opérations de nivellement général de la France depuis sa mise en service en 1885. Situé dans l'anse Calvo, sur le littoral du quartier d'Endoume à Marseille, il a fonctionné jusqu'à 1985, puis il a été remplacé en 1997 par un marégraphe numérique. Le calcul du niveau moyen de nivellement nécessitait, en parallèle aux enregistrements du marégraphe lui-même, la mesure quotidienne de différents paramètres, dont la température de l'eau de mer, comme facteurs correctifs. Compte tenu de leur usage en tant que référence administrative, ces enregistrements étaient régulièrement contrôlés et ont fait l'objet depuis 1885 d'une surveillance attentive et constante par du personnel qualifié. On pouvait donc les considérer a priori comme fiables.

Cette série de mesures de température quotidienne présentait deux des qualités essentielles pour déterminer

une tendance d'évolution à long terme : la durée et la régularité. Un petit nombre de ces mesures de température avait d'ailleurs été extrait et cité [6], voire deux années complètes traitées [11], dans des travaux portant sur l'hydrologie des eaux du golfe de Marseille. Mais, à notre connaissance, personne n'avait jamais examiné l'intégralité de ces archives originales. Les mesures du niveau de la mer enregistrées par le marégraphe ont naturellement fait l'objet d'un traitement, puisqu'elles servaient de référence pour le nivellement de la France. En revanche, les autres mesures complémentaires, en particulier celles de la température de l'eau de mer, prises quotidiennement, demeuraient sous leur forme manuscrite originale. Les préoccupations actuelles concernant l'évolution climatique globale, et le rôle mal défini qu'y joue l'océan, ainsi que, plus localement, les conséquences biologiques désastreuses [2,3,8] sur les peuplements marins des anomalies thermiques de la fin de l'été 1999 [9], suivies par celle de l'été 2003, ont fourni une pertinence très actuelle [4] à la tentative de reconstitution complète de cette série. C'est pourquoi nous avons entrepris de les consulter dans leur intégralité, et surtout de les enregistrer en les retranscrivant sous forme de fichier informatique, de façon à opérer un traitement exhaustif de cette information, qui fait l'objet de la présente communication.

2. Matériels et méthodes

2.1. Les archives du marégraphe

L'ensemble de ces mesures est conservé par l'Institut géographique national (IGN–Service de géodésie et du nivellement, 2–4, av. Pasteur, Saint-Mandé). Il se présente sous l'aspect de volumes reliés, chacun rassemblant dix années de feuilles de relevé mensuel, dont le modèle a été conservé, quasiment inchangé, depuis avril 1885. Sur chacune de ces feuilles, les relevés quotidiens sont portés en ligne jour à jour, dans la partie gauche pour les enregistrements du marégraphe, et dans la droite, sous forme de colonnes, pour les informations complémentaires. La colonne des valeurs de température a pour titre *température du thermomètre étalon*. Elles sont exprimées en degrés Celsius. Les autres colonnes de la partie droite de ces feuilles mensuelles concernent les conditions météorologiques globales : vitesse et direction du vent, pluviométrie et commentaires. Dans la partie commentaires est porté l'état d'agitation de la mer, estimé visuellement par le gardien du marégraphe. Sur les 996 feuilles de relevés mensuels couvrant la période 1885–1967, seules deux faisaient défaut. Mais, sauf pour ce qui concerne la température et la pression barométrique (éléments essentiels pour l'interprétation des données du marégraphe totalisateur), il y a de très nombreux manques pour les autres données.

3. Enregistrements des températures

En ce qui concerne les valeurs manuscrites de température, elles ne portent que sur la période allant du 2 février 1885 au 29 février 1968 ; elles sont ensuite absentes des feuilles de relevés. Les températures étaient mesurées à 12 h (heure locale). Au cours de ces 83 années, il y a relativement peu de données manquantes. Pour le traitement statistique mensuel présenté ici, nous avons considéré que, si dix valeurs quotidiennes dans le mois étaient manquantes, la moyenne mensuelle du mois n'était pas calculée. De plus, il nous est apparu que certaines valeurs, portant sur plusieurs jours successifs lors des derniers mois de fonctionnement du marégraphe, présentaient une absence de variation suspecte : la même valeur, au dixième près, étant reproduite parfois pendant une semaine. Pouvant faire penser à une interpolation « maladroite » de la personne chargée de ces mesures manuelles, nous ne nous sommes néanmoins pas crus autorisés à écarter ces séquences courtes, pensant que, au regard du nombre de données acquises (près de trente mille), elles pèseraient relativement peu dans le traitement de la série.

Des procédures de contrôle automatique et de validation de la transcription informatique de ces données manuscrites étaient opérationnelles durant la saisie (minima, maxima, moyenne et écart-type de chaque distribution mensuelle), pour permettre, en cas d'erreur, de revenir immédiatement aux données originales. Rares étaient les données grossièrement erronées, vraisemblablement consécutives à une erreur d'écriture ; elles étaient facilement repérables et ont été naturellement écartées. En tenant compte des distributions de fréquences de l'ensemble des données originales, ainsi que de la répétition du chiffre de la décimale (généralement de type pair), nous avons pu estimer la résolution des thermomètres utilisés à 0,2 °C.

Malgré nos recherches dans les archives de l'IGN, nous n'avons trouvé aucune trace écrite, ni du protocole de mesure de la température, ni des procédures de calibrage des thermomètres, ni non plus de l'endroit précis où étaient censées être mesurées ces températures de l'eau de mer. Ce point, essentiel pour la validation de la série, sera discuté plus loin. Nous utiliserons à titre de comparaison deux séries actuelles de température. La première (1996 à 2002) concerne la température de l'eau de mer mesurée en continu (moyenne des cinq mesures, toutes les demi-heures, entre 11 h 00 à 13 h 00 GMT) à 1 m de profondeur à la station marine d'Endoume, localisée à environ 1 km du marégraphe. La seconde série est constituée des relevés quotidiens (12 h 00 GMT) de la température de l'air à la station

Météo France de l'aéroport Marseille-Provence à Marignane pour la période 1984–1994.

4. Résultats

Nous ne pouvons fournir ici naturellement l'intégralité de ces quelques 30 000 données. Nous en présentons donc une synthèse.

Dans le **Tableau 1** sont reportées les moyennes annuelles pour chacune des années 1885 à 1967, ainsi que l'écart-type, les minima et les maxima des distributions de l'année. Les valeurs en italiques correspondent à des années où les mesures pour les mois d'hiver (décembre, janvier, février et parfois mars) de la période 1893 à 1912 sont suspectes, pour des raisons discutées plus loin. En excluant celles-ci, la plus faible moyenne annuelle (16,06 °C) est celle de l'année 1956, suivie dans l'ordre par les années 1887, 1888, 1890 et 1891 (avec respectivement 16,37, 16,54, 16,60 et 16,64 °C) ; la moyenne annuelle la plus élevée est rencontrée en 1893 (18,97 °C), suivie par celles des années 1933, 1943, 1928, 1920 (avec respectivement 18,74, 18,70, 18,47 et 18,43 °C). Les minima des moyennes mensuelles de température (non présentées ici) hivernales (janvier–février) sont de l'ordre de 9 à 10 °C. La valeur hivernale la plus faible (4,0 °C) est enregistrée pendant l'hiver exceptionnellement froid de 1956 (février) ; elle est plus basse de deux degrés que les deux minima qui la suivent : par ordre d'importance, 6,1 °C en janvier 1891 et 6,3 °C en janvier 1893. Les maxima des moyennes mensuelles de température estivales, de l'ordre de 25 à 27 °C, sont toujours enregistrés en juillet et/ou août ; la moyenne la plus chaude étant celle du mois d'août 1957. On note l'existence d'années avec des mois aux moyennes exceptionnelles, froides (1956, 1891, 1963) ou chaudes (1904, 1933, 1943, 1952).

Sur la **Fig. 1** sont présentées quatre distributions de moyennes mensuelles. La première est celle de la période 1885 à 1925 et la seconde va de 1926 à 1967 ; toutes deux proviennent de cette série du marégraphe. La troisième est celle des enregistrements de la température de l'eau de mer réalisés (de 11 h 00 à 13 h 00 GMT) à Endoume entre 1996 et 2002. La dernière est celle des relevés de température de l'air à la station Météo France de Marignane de 1984 à 1994. Les courbes 1 et 2 coïncident pour les températures hivernales les plus basses, mais ces moyennes mensuelles sont systématiquement plus élevées pour les mois plus chauds au cours de la période 1926–1967, comparée à la période 1885–1925. Pour l'eau de mer (courbe 3), les moyennes mensuelles hivernales

Tableau 1

Moyennes, écart-type des distributions, maxima et minima annuels de la température de l'eau de mer de surface au marégraphe de Marseille entre 1885 et 1967. Les valeurs en italiques (1894 à 1912) ne sont données qu'à titre indicatif, pour des raisons évoquées dans le texte

Table 1

Annual mean values, standard deviation, maxima and minima values of sea-surface temperature distribution (daily records) at the Marseilles tide recorder from 1885 to 1967. Data in italic form (1894–1912) are only of indicative significance for reasons that are discussed in the text

	1885	1886	1887	1888	1889	1890	1891	1892	1893	1894	1895
<i>moyenne</i>	18,08	17,03	16,37	16,54	16,68	16,60	16,64	17,31	18,97	<i>18,75</i>	<i>19,71</i>
<i>écart-type</i>	5,15	5,94	6,44	5,74	6,18	5,78	6,07	6,01	6,19	<i>4,80</i>	<i>5,03</i>
<i>minimum</i>	11,8	9,1	7,9	8,1	8,7	8,5	6,1	9,8	6,3	<i>10,8</i>	<i>11,6</i>
<i>maximum</i>	25,6	25,2	25,8	23,4	25,1	25,0	25,1	25,2	26,2	25,2	25,9
	1896	1897	1898	1899	1900	1901	1902	1903	1904	1905	1906
<i>moyenne</i>	<i>18,89</i>	<i>19,33</i>	<i>19,45</i>	<i>19,49</i>	<i>19,11</i>	<i>19,46</i>	<i>18,44</i>	<i>19,04</i>	<i>20,26</i>	<i>19,34</i>	<i>19,94</i>
<i>écart-type</i>	<i>4,78</i>	<i>5,21</i>	<i>4,89</i>	<i>5,27</i>	<i>5,03</i>	<i>4,47</i>	<i>4,53</i>	<i>4,01</i>	<i>4,81</i>	<i>4,71</i>	<i>4,25</i>
<i>minimum</i>	<i>11,6</i>	<i>10,0</i>	<i>12,3</i>	<i>9,8</i>	<i>11,9</i>	<i>12,9</i>	<i>11,1</i>	<i>13,7</i>	<i>14,0</i>	<i>13,6</i>	<i>14,9</i>
<i>maximum</i>	<i>26,2</i>	<i>26,3</i>	<i>25,9</i>	<i>26,7</i>	<i>25,3</i>	<i>24,8</i>	<i>24,7</i>	<i>24,0</i>	<i>27,3</i>	<i>26,8</i>	<i>25,8</i>
	1907	1908	1909	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1916	1917
<i>moyenne</i>	<i>19,37</i>	<i>19,35</i>	<i>20,50</i>	<i>18,09</i>	<i>19,72</i>	<i>17,84</i>	<i>17,64</i>	17,21	16,91	17,47	16,78
<i>écart-type</i>	<i>4,10</i>	<i>4,32</i>	<i>2,63</i>	<i>4,11</i>	<i>5,25</i>	<i>3,95</i>	<i>4,89</i>	4,92	5,97	5,25	6,46
<i>minimum</i>	<i>13,5</i>	<i>12,5</i>	<i>16,9</i>	<i>13,4</i>	<i>13,4</i>	<i>11,0</i>	<i>12,0</i>	10,5	9,6	11,4	9,0
<i>maximum</i>	<i>25,1</i>	<i>24,5</i>	<i>24,8</i>	<i>24,0</i>	<i>27,7</i>	<i>23,5</i>	<i>24,6</i>	24,2	25,1	25,8	25,3
	1918	1919	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927	1928
<i>moyenne</i>	17,43	17,11	18,43	17,53	17,16	17,06	17,42	17,43	17,98	18,31	18,47
<i>écart-type</i>	5,58	5,72	5,51	6,20	5,77	6,19	6,33	5,81	5,51	5,53	6,37
<i>minimum</i>	9,8	10,0	11,1	9,9	8,9	8,2	6,5	10,4	10,1	10,6	10,5
<i>maximum</i>	25,4	26,0	25,9	26,5	25,6	26,5	26,4	25,3	25,2	25,7	29,0
	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938	1939
<i>moyenne</i>	18,00	18,12	18,29	17,59	18,74	17,90	17,65	17,54	17,82	17,54	17,66
<i>écart-type</i>	6,85	5,45	5,68	5,68	6,43	5,99	6,39	5,22	5,69	5,85	5,18
<i>minimum</i>	7,9	10,3	9,3	9,6	9,3	9,7	8,6	11,4	10,4	9,1	11,0
<i>maximum</i>	26,6	25,3	25,6	26,4	27,2	26,1	27,3	25,0	26,0	25,9	24,8
	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950
<i>moyenne</i>	17,07	16,86	17,74	18,70	17,53	17,78	17,45	18,05	17,91	18,40	17,99
<i>écart-type</i>	6,29	6,17	6,94	6,11	6,41	6,31	5,59	6,68	4,76	6,14	6,43
<i>minimum</i>	7,4	7,6	7,0	10,6	8,9	6,9	9,9	8,2	11,3	11,2	9,5
<i>maximum</i>	25,6	26,5	25,9	27,5	26,8	26,1	25,1	27,2	24,7	26,6	27,6
	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961
<i>moyenne</i>	17,51	17,69	17,46	17,01	17,64	16,06	17,88	16,99	17,96	17,26	17,99
<i>écart-type</i>	5,74	6,56	6,05	6,09	5,32	6,51	6,27	5,39	5,77	5,58	5,52
<i>minimum</i>	10,1	9,1	7,7	7,7	11,0	4,0	8,6	9,9	10,2	9,4	9,4
<i>maximum</i>	25,4	27,7	25,6	24,2	25,5	24,6	30,9	25,0	26,2	24,2	25,4
	1962	1963	1964	1965	1966	1967					
<i>moyenne</i>	16,89	17,14	17,60	16,75	17,17	17,21					
<i>écart-type</i>	6,26	5,85	6,09	5,60	5,45	5,89					
<i>minimum</i>	9,4	7,1	10,2	8,1	9,4	9,4					
<i>maximum</i>	26,1	25,8	26,3	24,4	23,7	25,9					

actuelles ne sont jamais inférieures à 12 °C (février), donc supérieures de deux degrés à celles mesurées au marégraphe et, au contraire, inférieures de trois à quatre degrés en juillet–août. Pour les températures de l'air (courbe 4) enregistrées à Marignane, elles sont inférieures en hiver de trois à quatre degrés à celles correspondantes de la série marégraphe, et seulement d'environ un degré en été.

Dans la Fig. 2, nous présentons la distribution au cours du temps des moyennes annuelles des 83 années prises en compte, mais calculées uniquement pour les huit mois allant d'avril à novembre (les valeurs de décembre à mars ont été écartées, pour l'ensemble de la série, compte tenu de la période contestable allant de 1894 à 1913 – en italique dans le Tableau 1). La distribution de ces moyennes sur les 83 années

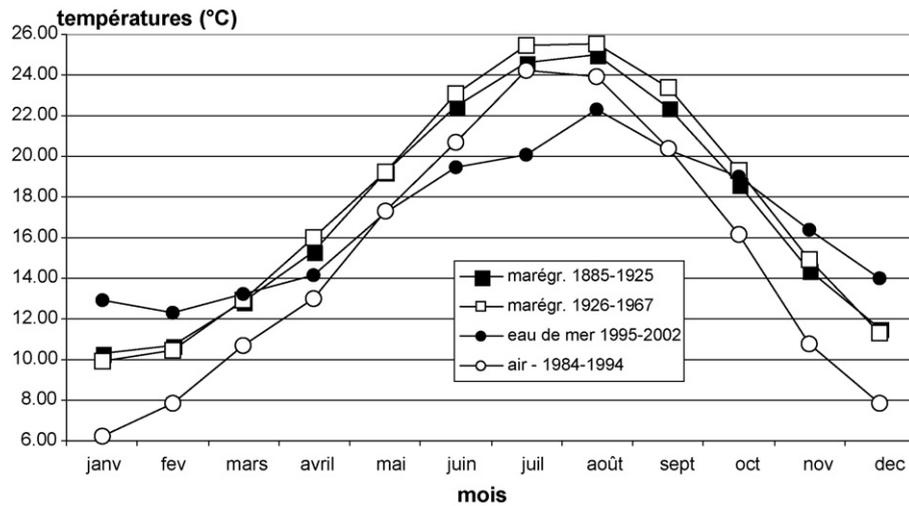


Fig. 1. Températures moyennes mensuelles calculées pour la série du marégraphe de Marseille sur les périodes 1885–1925 et 1926–1967 (1 mesure par jour), pour l'eau de mer à la station marine d'Endoume de 1996 à 2002 (cinq mesures entre 11 h et 13 h GMT) et pour la température de l'air à Marignane entre 1984 et 1994 (1 mesure par jour).

Fig. 1. Monthly average temperatures of the Marseilles tide-recorder series over two time periods, 1885–1925 and 1926–1967 (1 measurement per day), over sea-surface temperatures records (station marine d'Endoume) from 1996 to 2002 (five measurements from 11 h to 13 h GMT), and over air-temperature records at Marignane from 1984 to 1994 (1 measurement per day).

d'enregistrement met en évidence un accroissement de la température en fonction du temps, faible mais significatif ($r = 0,215$; $n = 83$; $p < 0,05$). Le coefficient de détermination de la relation est faible ($R^2 = 0,05$), expliquant peu la variance totale, puisqu'à l'intérieur d'une même année d'autres facteurs agissent, comme la répartition des valeurs estivales et hivernales ou les années très froides ou très chaudes. Cet accroissement significatif de la température moyenne peut être estimé à $+0,66$ °C en 100 ans. Pour la période la plus chaude de l'année (juin à septembre), on arrive à une estimation toujours significative et légèrement plus forte ($+0,76$ °C en 100 ans) de ce gradient. Si l'on compare les moyennes

mensuelles, de part et d'autre de l'année 1925, et pour les mois de juin à octobre inclus, celles-ci sont respectivement de $22,69$ °C (écart-type = $2,66$ et $n = 205$) et de $23,29$ °C (écart-type = $2,63$ et $n = 210$). Cette différence moyenne de $+0,598$ °C en 83 ans est hautement significative à $p < 0,001$ et le risque de rejet de H_0 diminue à une valeur très faible ($p < 10^{-6}$) quand la comparaison porte, non plus sur les valeurs absolues, mais sur les moyennes mensuelles corrigées, pour chaque mois, de la moyenne du mois calculée sur l'ensemble de la période considérée. Cet accroissement de la température moyenne porte donc essentiellement sur les mois les plus chauds. On ne constate en effet rien de tel pour les

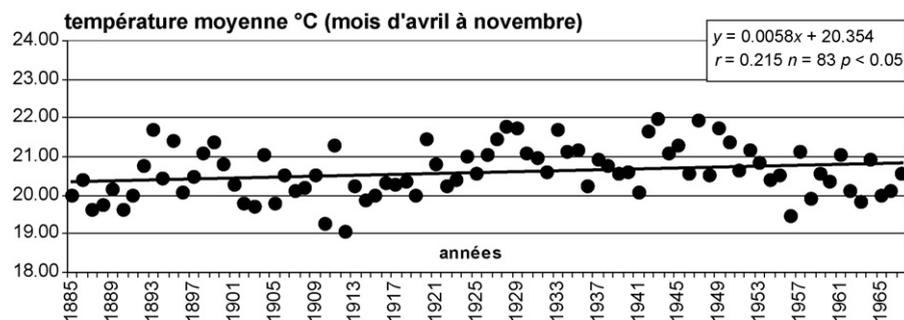


Fig. 2. Températures moyennes des années 1885 à 1967 (calculées sur les mois d'avril à novembre), avec droite de régression linéaire positive sur l'ensemble de la période.

Fig. 2. Yearly mean temperatures (from April to November) over the 1885–1967 period, with the representation of the significant positive linear regression.

mois plus froids, de mars à mai et novembre. Les valeurs moyennes de respectivement 15,67 °C pour les années 1885 à 1925 et de 15,79 °C pour 1926 à 1967 représentent certes une augmentation de +0,12 °C, mais cette différence n'apparaît statistiquement significative, ni par le traitement des valeurs absolues, ni par celui des écarts à la moyenne climatique.

5. Discussion

L'examen exhaustif de la série de données, dite « du marégraphe de Marseille », archivée à l'Institut géographique national et examinée ici pour la première fois dans son intégralité, amène à une première conclusion sans ambiguïté : ces températures ne sont pas celles habituelles d'une eau de mer des côtes méditerranéennes nord-occidentales. Les minima hivernaux sont en effet fréquemment inférieurs à 7 °C et les moyennes sur l'ensemble de la série des mois de janvier et février sont respectivement de 9,8 et 10,5 °C. Or, la température des eaux méditerranéennes, mêmes les plus profondes, est très rarement inférieure à 13 °C [1]. Dans la partie de la Méditerranée considérée comme la plus froide, le golfe du Lion, les températures des eaux superficielles peuvent descendre, ponctuellement et localement, un peu plus bas [7,10], sans néanmoins atteindre de valeurs aussi faibles. Mais ce ne sont pas non plus des valeurs de température de l'air. En effet, les minima hivernaux sont trop élevés comparativement à ce qui peut être habituellement mesuré dans la région de Marseille, comme nous avons pu le montrer à partir du traitement des données de la station Météo France de Marignane.

Se pose alors la question de déterminer ce que représentent véritablement ces mesures de température. Nous l'avons dit, nous n'avons pas pu retrouver le texte fixant le protocole de ces mesures dans les archives de l'IGN. Mais deux endroits semblent naturels pour les réaliser : le canal d'accès amenant l'eau de mer de surface de l'extérieur vers le puits au sein duquel se trouve le flotteur du marégraphe ou l'eau de mer remplissant le puits lui-même. Compte tenu du fait que cette mesure de température servait, par le calcul de la densité, à corriger les mesures de niveau, c'est très vraisemblablement à cet endroit qu'était prise la température de l'eau, ce puits étant situé sous le plancher du bâtiment abritant le marégraphe. L'ensemble de l'eau contenue dans le puits est en équilibre thermique, d'une part avec l'eau de mer extérieure (cet échange est limité, étant donné la faible section du canal d'accès et les dispositifs d'amortissement), mais également avec l'air de la chambre du sous-sol, par

une surface d'échange de l'ordre de 0,5 m². La chambre n'étant pas régulée thermiquement, elle est donc plus froide en hiver que l'eau de mer. Les mesures de température se faisant, en outre, vraisemblablement dans la couche d'eau superficielle du puits, ceci expliquerait que les minima soient trop froids pour correspondre à une eau de mer *libre*, mais aussi trop élevés en période hivernale pour correspondre à l'air dans la pièce. On comprend alors que les seuls auteurs [11] ayant travaillé sur une année complète d'enregistrements du marégraphe aient considéré les données hivernales comme *suspectes* par comparaison à leurs propres mesures dans le golfe de Marseille, sans pouvoir néanmoins expliquer cette différence.

Cette hypothèse explique aussi pourquoi nous avons dû écarter certaines des valeurs de cette série. En effet, à partir du 8 février 1893, et jusqu'en 1913, un règlement administratif a autorisé l'installation d'un chauffage d'appoint au rez-de-chaussée du bâtiment, dans la partie où se situait la mécanique du marégraphe enregistreur, donc un étage au-dessus de la salle du puits. Ce chauffage d'appoint était utilisé en décembre, janvier, février. Au cours de ces années, il est fait mention dans les feuilles de relevés de la date du début et de fin du chauffage, avec indication de l'utilisation d'un second thermomètre étalon mesurant vraisemblablement la température de la pièce principale. Cette deuxième série de données de température n'apparaît sur les relevés, et en marge des feuillets, qu'en période de chauffage. Ce chauffage de la partie haute du bâtiment devait avoir des conséquences sur la salle du puits en sous-sol, puisqu'une comparaison entre les deux séries de températures montre de 1,5 à 2 °C d'écart entre les deux endroits. La distribution moyenne des températures pendant ces mois d'hiver, où le chauffage était utilisé, se distingue très facilement par comparaison avec les 70 années où le bâtiment n'a pas été chauffé. C'est la raison pour laquelle ces données ont naturellement été écartées dans le traitement statistique des températures.

Jusqu'à ce travail, ces mesures de température avaient toujours été considérées par la communauté des océanographes, mais aussi par les personnels de l'IGN gestionnaires de ces archives, comme concernant l'eau de mer. D'ailleurs, une lettre administrative que nous avons retrouvée (sans signature et datée du 15 avril 1915) mentionne explicitement que « des mesures de température d'eau de mer sont enregistrées quotidiennement à Marseille au marégraphe ». En second lieu, dans de nombreux documents administratifs et scientifiques, on retrouve la trace de l'existence d'archives de température d'eau de mer, voire même de densimétrie,

grandeur qui implique non seulement la mesure de température mais également celle de la salinité. Il y est fait mention dans certaines minutes du *Comité du nivellement général de la France*, que nous avons pu également consulter. Enfin, et c'est la troisième raison de cette confusion, ce point semblait confirmé par l'existence, dans les archives du Centre d'océanologie de Marseille, d'une série de mesures de températures de l'eau de mer réalisées quotidiennement au marégraphe entre 1975 et 1983. Or, ces huit années d'archives, conservées à la station marine d'Endoume, qui ont été retrouvées et retranscrites par nous (consultables sur le site : www.com.univ-mrs.fr/SLT/archives/archive.html), concernent, quant à elles, et sans nul doute, des températures de l'eau de mer méditerranéenne, prises au marégraphe. Mais, aucun des minima de la température de l'eau de mer n'y est inférieur à 12 °C, différence essentielle avec la série du marégraphe que nous avons reconstituée. Consulté à ce propos, le professeur André Bourdillon, responsable de ces huit années de mesures, nous a clairement indiqué ensuite que ces températures avaient été mesurées par le gardien du marégraphe, mais au moyen d'un thermomètre à renversement (Richter et Weise), d'un type couramment utilisé en hydrologie, et qu'il lui avait lui-même fourni. Ces mesures étaient faites, non pas dans le puits du flotteur, mais dans le canal d'accès à ce puits, c'est-à-dire dans de l'eau de mer *libre*. On comprend que la dynamique thermique de ces huit années diffère des mesures enregistrées dans la série authentique « du marégraphe ». D'ailleurs, pour celle-ci, ce qui importait aux opérateurs était de savoir quelle était la densité de l'eau de mer dans le puits, grandeur influençant la position du flotteur, donc l'estimation du niveau moyen des mers, et non la température réelle de l'eau de mer du golfe de Marseille.

6. Conclusion

Doit-on alors considérer que cette série de températures enregistrées au marégraphe de Marseille est sans utilité scientifique ? Nous ne le pensons pas. Tout d'abord parce qu'elle a souvent été évoquée comme une potentialité d'accès à des archives historiques de la température de l'eau de mer, alors qu'entièrement reconstituée, elle montre ses ambiguïtés et ses limites en même temps que ses qualités. En effet, quel que soit l'endroit où se faisaient ces mesures, on peut être raisonnablement certain que le protocole était répétitif, puisque cette grandeur servait à corriger les enregistrements du marégraphe totalisateur. Elle constitue donc bien une série chronologique homogène, régulière,

quotidienne et fiable. Et il apparaît que cette série reflète une tendance nette à l'augmentation entre 1885 et 1967 de la température moyenne d'une eau de mer, *confinée* certes, mais une température de l'eau de mer de surface néanmoins. Les données en ce domaine sont suffisamment rares pour que l'on en tienne compte.

Remerciements

La saisie des données dans les locaux de l'IGN a été rendue possible par l'attribution d'un budget spécifique par l'UMR CNRS 6540 Dimar, et surtout grâce l'accueil des personnels du service du nivellement de l'IGN, particulièrement M. Paul Bonnetain. Nos remerciements vont à L. Laubier pour ses nombreuses remarques et suggestions pertinentes.

Références

- [1] J.-P. Bethoux, B. Gentili, J. Raunet, D. Tailleux, Warming trend in the western Mediterranean deep water, *Nature* 347 (1990) 660–662.
- [2] C. Cerrano, G. Bavestrello, C.N. Bianchi, R. Cattaneo-Vietti, S. Bava, C. Morganti, C. Morri, P. Picco, G. Sara, S. Schiaparelli, A. Siccardi, F. Sponga, A catastrophic mass-mortality episode of gorgonians and other organisms in the ligurian Sea (NW Mediterranean), summer 1999, *Ecol. Lett.* 3 (2000) 284–293.
- [3] J. Garrabou, T. Pérez, S. Sartoretto, J.-G. Harmelin, Mass-mortality event in red-coral (*Corallium rubrum*, Cnidaria, Anthozoa, Octocorallia) populations in the Provence region (France, NW Mediterranean), *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 217 (2001) 263–272.
- [4] L. Laubier, Climatic changes and trends in marine invertebrates: a need for relevant observing networks and experimental ecophysiology, *Atti Assoc. It. Oceanol. Limnol.* 14 (2001) 15–24.
- [5] S. Levitus, J.I. Antonov, T.P. Boyer, C. Stephens, Warming of the world ocean, *Science* 287 (2000) 2225–2229.
- [6] H.J. Minas, A propos d'une remontée d'eaux « profondes » dans les parages du golfe de Marseille (octobre 1964). Conséquences biologiques, *Cah. Océanogr.* 20 (8) (1968) 23–28.
- [7] J. Pascual, J. Salat, M. Palau, Evolucion de la temperatura del mar entre 1973 y 1994, cerca de la costa catalana, in: *Int. Coll. Okeanos*, Montpellier, 1995. pp. 23–28.
- [8] T. Pérez, J. Garrabou, S. Sartoretto, J.-G. Harmelin, P. Francour, J. Vacelet, Mortalités massives d'invertébrés marins : un événement sans précédent en Méditerranée nord-occidentale, *C. R. Acad. Sci. Paris, Ser. III* 323 (2000) 853–865.
- [9] J.-C. Romano, N. Bensoussan, W.A.N. Younes, D. Arlhac, Anomalie thermique dans les eaux du golfe de Marseille durant l'été 1999. Une explication partielle de la mortalité d'invertébrés fixés ?, *C.R. Acad. Sci. Paris, Ser. III* 323 (2000) 415–427.
- [10] J. Salat, J. Pascual, The oceanographic and meteorological station at L'Estartit (NW Mediterranean), in: *CIESM Workshop Series No. 16, Tracking long-term hydrological change in Mediterranean Sea*, Monaco, 22–24 avril 2002. pp. 31–34.
- [11] M. Travers, A. Travers, Données sur quelques facteurs de l'écologie du plancton dans la région de Marseille 2. La température, les précipitations, la salinité et la circulation des eaux, *Téthys* 4 (3) (1972) 515–534.