



Géophysique externe, climat

Série du marégraphe de Marseille : mesures de températures de surface de la mer de 1895 à 1956 : une correction

Marseilles tide-recorder series: Sea surface temperature measurements from 1895 to 1956: A correction

Jean-Claude Romano^{a,*}, Marie-Catherine Lugrezi^a, Dominique Durand^b,
Françoise Durand-Le-Breton^b

^a UMR CNRS 6134, sciences pour l'environnement (SPE), centre scientifique-Vignola, université Pascal-Paoli, route des Sanguinaires, 20000 Ajaccio, France

^b 69, rue Haxo, 75020 Paris, France

INFO ARTICLE

Historique de l'article :

Reçu le 28 février 2010

Accepté après révision le 6 octobre 2010

Disponible sur internet le 17 novembre 2010

Présenté par Michel Petit

Mots clés :

Températures eau de mer de surface

Méditerranée nord-occidentale

Série historique

Marégraphe de Marseille

Réchauffement climatique

Keywords:

Sea-surface temperatures

North-western Mediterranean

Historical series

Marseilles tide recorder

Global warming

RÉSUMÉ

En 2007, étaient étudiées ici des températures mesurées quotidiennement à Marseille, au marégraphe, entre 1885 et 1967. Sur la base de l'information alors disponible, ces températures pouvaient être considérées comme celles de températures de surface de la mer. Ce n'était pas le cas : il s'agissait de températures prises à l'intérieur du bâtiment et les auteurs corrigent cette erreur en présentant ici la série authentique, retrouvée à la suite de la publication du précédent article. Cette série, plus courte (1895–1956) conduit à des conclusions proches de l'étude précédente. Il y a bien eu réchauffement significatif des eaux littorales méditerranéennes de surface, de +1,6 °C en 61 ans, de +1,3 °C durant les mois de janvier à mai + décembre et de +2,2 °C durant ceux de juin à novembre. C'est entre 1895 et 1925 que se rencontrent les moyennes mensuelles (sauf janvier) les plus froides et les minima annuels les plus bas (à l'exception de 1956) par rapport à 1925–1956.

© 2010 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

ABSTRACT

In 2007, a daily temperature series, which has been collected from 1885 to 1967 at the Marseilles tide recorder, was published here. Upon the available information provided by the data managing office, they were considered as sea-surface temperatures. Unfortunately they were not but air temperature inside the building. In the present paper, the authors correct this error by studying the true seawater temperature series which had been dug out after the publication of the precedent paper. The study of this slightly shorter series (1895–1956) leads to close conclusions. Along these 61 years, the warming trend of the surface seawater rises to +1.6 °C, to +1.3 °C if only January to May and December are selected and +2.2 °C during the June to November period. In the first half part of the series (1895–1925), the average value of each month distributions (except January) and annual minimal (except 1956) are significantly lower than along the second (1925–1956).

© 2010 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

* Auteur correspondant.

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

Abridged English version

In 2007 was reported and studied here (Romano and Lugrezi, 2007) a long time series (from 1885 to 1967) of daily-measured temperatures at the Marseilles's (France) tide recorder. On the basis of the information which was then available, these historical data were presented as "Mediterranean surface seawater temperatures", despite the fact that the data exhibit an anomalous annual dynamic, as indicated and discussed by the authors. They now apologize because these previously-published data were not sea water temperatures, but they concerned temperatures taken inside the building of the Marseilles tide recorder. The original handwritten surface-sea-water temperatures series was recently rediscovered (Coulomb, 2010), then digitized by us and is presented and treated in the present article. Taking into account the fact that most of these temperatures were taken at 12 h 00 (local time), but some others at 14 h 00, a correction was made for the latter in order to homogenize the temperature distribution and its evolution. This series is slightly shorter (from November 1894 to December 1956) than the previously published one, but data has been collected near the same place and with the same daily frequency, with a remarkable few-absence of blanks in the measures. As attested by the lowest values in winter (around 10–11 °C), the highest in summer (around 28–30 °C), and the annual dynamic, this series concerns, without any doubt, Mediterranean sea-surface temperatures as they are classically reported in the literature, in the past and the present. A comparison with the archived meteorological database for this region of South France shows that the amplitude of the surface-seawater temperatures variations over all the considered period is in a close correspondence to the latter, in particular for the coldest (1910, 1910, 1956) or the warmest years (1943, 1947, 1949). The whole data set (almost 28,000 data) is synthesized here by using annual statistical values (Table 1), with the emphasis of the significant difference in the mean values over two periods between the beginning of the series to 1925 (the median) and after. The related mean values of these two time periods are significantly different, as it was demonstrated by the previously published series. The ten coldest years are found before 1925 (with the 1956 exception which is considered as the coldest year of the century in Europe) and the ten warmest after 1925. The evolution of the mean annual values over the period is presented in Fig. 1. A clear positive and statistically-based warming trend clearly appears along these sixty one years and it can be estimated to about +1.6 °C over the period. A seasonal treatment of the data (Fig. 2) confirms this tendency, not only during the warmest months of the year (+2.2 °C for June to November), but also during the coldest (+1.3 °C for December to May), with, for these last, a lesser value of slope for the relationship between temperature versus time, but in association with a lower variability in the sea-water temperature data distributions. The intra-annual standard deviations are also regularly growing with time, attesting of an increasing difference in sea-surface temperatures between the coldest and the warmest months which is considered as an another print of global

warming. Monthly average distributions of these sea-surface temperatures were compared to some other more recent series in Fig. 3: it can be shown that the historical series presented here, in its extreme values, averages and annual dynamics, is closer to those of sea water temperatures than the previously reported series, or to meteorological data of air temperatures. It was a great and rare opportunity to compare (Fig. 4) historical data of air (Romano and Lugrezi, 2007) and sea-surface temperatures (this paper) which have been measured, at the same place, by the same operators. With no surprise, the two distributions are strongly linked, but with a sufficient number of differences to study, in the future, the eventual changes of sea-water temperature specific response to the global warming.

1. Introduction

En 2007, était publié un article (Romano et Lugrezi, 2007) sur une série de températures d'eau de mer de surface, mesurées tous les jours, au marégraphe de Marseille de 1885 à 1967. Quelques années de cette série avaient dans le passé été exploitées (de 1930 à 1939 dans Rouch (1940) et deux années consécutives dans Travers et Travers (1972) mais, à notre connaissance, la série n'avait jamais été, en fait, ou examinée, ou traitée dans son intégralité. Lors de la transcription numérique de cette série dans les locaux de l'Institut Géographique National (Service de Géodésie et du Nivellement, 2-4 avenue Pasteur, Saint-Mandé) en 2003, il était apparu immédiatement que certaines valeurs, en particulier celles de trop faibles températures hivernales, ne correspondaient pas à celles rencontrées dans les eaux littorales de Méditerranée nord-occidentale. Dès le début de la discussion de cet article (Romano et Lugrezi, 2007), les auteurs écrivaient d'ailleurs « *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 auteurs n'avaient pu avoir accès sur place à aucun protocole de mesure archivé et, sur la foi de la personne qui en avait la charge à l'IGN et ne connaissait pas d'autres séries de températures mesurées au marégraphe de Marseille, ils en avaient déduit dans leur article que ces mesures quotidiennes devaient être réalisées dans l'eau de mer du puits du flotteur. Celui-ci, en communication par un canal avec l'eau de mer de l'anse Calvo devait être en équilibre thermique avec l'atmosphère de la chambre du puits, ce qui pouvait expliquer ces anomalies. Néanmoins, l'information apportée par cette série longue de mesures de température leur avait paru suffisamment importante et originale, pour qu'ils en publient une synthèse et une interprétation des données pour ce qui était leur principale préoccupation, c'est-à-dire le réchauffement climatique dont on sait l'importance qu'il revêt de nos jours (Bethoux et al., 1990 ; Levitus et al., 2000 ; Romano et al., 2000). À la suite de cet article, une note rectificative (Coulomb, 2010) signalait que cette série concernait des températures à l'intérieur du bâtiment et non des températures d'eau de

mer, comme indiqué par erreur par l'IGN, et que la série originale avait été retrouvée. Cette note (Coulomb, 2010), apportait, en outre, de précieuses informations permettant de corriger les hypothèses de (Romano et Lugrezi, 2007) sur le protocole de mesure de ces données. Après l'examen d'un échantillon de cette nouvelle série retrouvée, une évidence s'imposait : les auteurs, Romano et Lugrezi, 2007, n'avaient pas numérisé la bonne série de températures de l'eau de mer. Comme nous tenions absolument à corriger cette erreur involontaire, cette nouvelle série de près de trente mille données a été numérisée par nos soins en 2009. C'est la présentation et la synthèse de cette nouvelle série et son interprétation qui font l'objet du présent article.

2. Matériel et méthodes

2.1. Les documents manuscrits originaux

Ils se présentent sous la forme de liasses annuelles, contenant, pour chacune, agrafés ensemble, les douze feuillets mensuels de relevés. La série débute en novembre 1894 et se termine en décembre 1956. Sur les 734 feuillets mensuels, il n'en manque que 9 (janvier à avril 1900 ; avril 1924 ; octobre 1928 ; avril et mai 1929 ; juin 1935). Chaque feuillet mensuel comprend sept colonnes dont quatre pour respectivement le jour et l'heure de la mesure, la température (sous l'intitulé « *température de l'eau dans l'éprouvette* ») et enfin « *Observations* » (où l'on trouve signalés les jours de tempête où la mesure n'a pu être effectuée). Les trois autres colonnes sont consacrées à la correction de données de densité, ce qui explique le titre « *Observations densimétriques* » des feuillets mensuels, avec mention de l'année et du mois. De ces dernières, il ne sera pas tenu compte dans le présent article.

2.2. Numérisation des documents originaux et transcription des données

Les documents originaux ne pouvant pas quitter les locaux de l'IGN à St Mandé, la numérisation par scanner de tous les feuillets mensuels originaux a été faite sur place, suivie ensuite par la lecture des données sur écran et leur dictée pour la saisie au clavier.

2.3. Présentation des données

Comme dans le cas du dépouillement de la série précédente (Romano et Lugrezi, 2007), certaines écritures ont nécessité une accoutumance à la calligraphie de l'époque, mais dans l'ensemble, il y eut peu d'incertitudes de lecture et celles-ci pouvaient être facilement levées, car au bas de chaque feuillet mensuel, le gardien du marégraphe portait la moyenne mensuelle des températures, laquelle était comparée à celle calculée automatiquement lors de la saisie au clavier (ainsi d'ailleurs que la dispersion, les maxima et minima mensuels). C'est l'ensemble de plus de 27 000 données qui a été retranscrit, et non pas les valeurs moyennes calculées à l'époque, lesquelles se sont souvent avérées fausses. En cas de divergence, la série mensuelle était relue, éventuellement

une valeur ambiguë, examinée et corrigée. Un problème critique s'est posé pour l'heure de la mesure : dans plus de 70 % des cas, elle était faite à 12 h ; les mentions sur certains feuillets du décalage avec les heures locales d'hiver et d'été, montrent qu'il s'agit du midi GMT tandis que, jusqu'en novembre 1912, les feuilles mentionnent 9 h du matin, sans autre précision.

2.4. Traitement des données

La question de l'heure de la mesure est un point sensible pour des données de température. En effet, si en hiver les températures de la mer en surface varient peu au cours de la journée (Bensoussan et al., 2004) et donc cette différence peut être négligée, en été, en revanche, les variations horaires sont importantes en début et en fin de la période d'ensoleillement. Or, les mesures à 9 h du matin ne concernent que le début de la série (de 1895 à 1912) et le risque était alors grand de majorer une éventuelle tendance au réchauffement sur la période, du fait que les données jusqu'en novembre 1912 étaient nécessairement plus faibles, puisque les mesures étaient faites plus tôt. Aussi, pour les traitements statistiques de l'ensemble, nous avons choisi, jusqu'à cette date, de majorer pour les mois de juin à novembre, chaque valeur mensuelle de 3 %. C'est en effet l'ordre de grandeur de la croissance de la température en deux heures, sur ce créneau horaire, qui a été calculé à partir des mesures actuelles, toutes les trente minutes, de températures d'eau de mer de surface de la série CAPCOM (Bensoussan et al., 2004), qui est utilisée ici à titre de référence. De plus, les neuf moyennes mensuelles manquantes ont été remplacées par la moyenne mensuelle correspondante des dix années les encadrant.

À titre de comparaison, nous utiliserons plusieurs autres séries de température. La première, (CAPCOM), concerne la température de l'eau de mer mesurée en continu (moyenne des mesures, toutes les demi-heures), réalisées entre 1996 à 2002, à 2 m de profondeur à la Station Marine d'Endoume, localisée à environ 1 km du marégraphe (Bensoussan et al., 2004) ; nous y avons sélectionné les données entre 11 h 00 à 13 h 00 GMT. La seconde série est constituée des relevés quotidiens (12 h GMT) de la température de l'air à la station Météo-France de l'aéroport Marseille-Provence pour la période 1984 à 1994. Trois séries longues de mesures de températures d'eaux de mer méditerranéennes sont utilisées dans la discussion : allant des années soixante à l'actuel (Bensoussan et al., 2009), elles ont été mesurées respectivement à l'Estartit (côte catalane espagnole–Pascual et al., 1995), à Villefranche-sur-mer (données SOMLIT_INSU-CNRS) et à l'île du Levant (Bensoussan et al., 2009) (mesures quotidiennes de l'eau de mer de surface – données inédites aimablement communiquées par la Marine Nationale). Enfin, à côté de cette nouvelle série correspondant à des mesures associées au fonctionnement du marégraphe, nous avons pu numériser, à titre aussi de comparaison, une autre série de mesures quotidiennes de densimétrie et de températures d'eau de mer, réalisées entre décembre 1894 et décembre 1899, dans les mêmes conditions que celles du marégraphe et en parallèle, mais à

l'île du Planier, située à environ 7 km de la côte, dans l'ouverture du golfe de Marseille.

3. Résultats

La synthèse de cette longue série de plus de 27 000 données de la température de l'eau de mer de surface est présentée dans le **Tableau 1**. Y sont portées les moyennes annuelles pour chacune des années 1895 à 1956, ainsi que l'écart-type, les minima et maxima des distributions de l'année. Les quatre moyennes annuelles les plus faibles sont celles des années 1956 (14,59 °C), 1912 (15,08 °C), 1910 (15,14 °C) et 1954 (15,26 °C). Ces années appartiennent à deux périodes de baisses très marquées de températures qui apparaissent nettement sur la **Fig. 1**. Mais si 1956 reste bien aussi l'année où le minimum annuel est le plus faible (7,6 °C), les deux années au minima les plus faibles sont ensuite 1929 (7,9 °C) et 1895 (8,8 °C). Les trois années aux moyennes les plus chaudes font partie de la même décennie : 1943 (18,43 °C), 1947 (18,59 °C) et 1949 (18,78 °C), mais avec des maxima rencontrés lors des années 1952 (28,5 °C), 1941 (28,8 °C) et 1947 (28,9 °C). La variabilité annuelle des températures de l'eau de mer, représentée ici par l'écart-type des distributions (**Tableau 1**) est de l'ordre de 3 à 4, avec deux valeurs extrêmes, lors

de deux années pourtant consécutives, 1911 (4,68) et 1912 (2,20). Ces écarts intra-annuels de la température ne sont pas constants tout au long de la série : la valeur de l'écart-type augmente régulièrement au cours du temps, entre 1895 et 1956 et cette croissance des écarts est une tendance linéaire très hautement significative ($r=0,389$, $n=61$; $p<0,001$). Les trois dernières cellules au bas du **Tableau 1** indiquent les valeurs de ces mêmes quatre grandeurs statistiques, mais calculées sur la distribution des moyennes annuelles, d'abord sur toute la durée de la série et ensuite sur deux groupes : de 1895 à 1925, d'une part, et de 1925 à 1956, d'autre part.

L'évolution de la température moyenne annuelle de l'eau de mer au long de cette série est présentée dans la **Fig. 1**. En soixante et un ans, la tendance au réchauffement est très nette, avec un accroissement très hautement significatif de 1,6 °C entre 1895 et 1956 ($r=0,530$; $n=61$; $p<0,001$) et ceci bien que nous ayons pris la précaution de légèrement majorer les moyennes des six mois les plus chauds entre 1895 et 1912 (voir **Matériel et méthodes**). Les dix années les plus froides se situent toutes avant 1925 (à l'exception de 1956 qui, on l'a vu, est la plus froide de la série, la plus froide d'ailleurs du siècle pour les températures de l'air d'après **Séchet (2004)**), et les dix années les plus chaudes sont, elles, toutes rencontrées au-delà de 1925.

Tableau 1

Moyennes, écart-types, minima et maxima des distributions annuelles des températures de l'eau de mer au marégraphe de Marseille entre 1895 et 1956, et, en bas du tableau, de l'ensemble de la série et de part et d'autre de l'année 1925.

Table 1

Annual average, standard deviation, minimal and maximal values of surface seawater near the Marseilles tide recorder from 1895 to 1956, and, on the bottom, the same values from the whole series and before and after 1925.

<i>année</i>	1895	1896	1897	1898	1899	1900	1901	1902	1903	1904	1905
<i>moyenne</i>	16,38	15,67	16,05	16,92	16,95	16,70	16,09	16,02	15,73	16,19	16,29
<i>écart-type</i>	4,20	3,24	3,29	3,75	3,73	3,33	3,72	3,33	3,45	3,95	3,53
<i>minimum</i>	8,8	10,2	9,5	11,0	11,0	9,8	9,1	9,9	10,5	10,7	9,6
<i>maximum</i>	24,9	24,8	25,0	25,0	25,2	26,2	25,0	24,0	22,5	25,3	24,1
<i>année</i>	1906	1907	1908	1909	1910	1911	1912	1913	1914	1915	1916
<i>moyenne</i>	16,54	15,70	15,85	15,52	15,14	16,36	15,08	16,48	16,33	16,49	16,30
<i>écart-type</i>	3,79	3,11	2,90	3,14	2,90	4,68	2,20	3,02	3,25	3,67	2,86
<i>minimum</i>	9,7	9,0	9,0	9,2	9,4	9,0	9,5	10,2	11,2	9,7	11,8
<i>maximum</i>	24,8	23,0	22,4	22,1	21,5	26,2	20,7	24,3	24,0	23,1	22,7
<i>année</i>	1917	1918	1919	1920	1921	1922	1923	1924	1925	1926	1927
<i>moyenne</i>	16,65	16,10	15,97	16,26	15,90	15,89	15,82	15,76	16,87	17,12	16,82
<i>écart-type</i>	3,58	3,20	3,77	2,81	2,88	3,42	3,70	3,07	3,49	3,68	3,39
<i>minimum</i>	11,0	11,0	11,0	11,9	11,6	10,4	9,5	11,0	10,5	10,6	10,9
<i>maximum</i>	24,0	23,0	24,5	22,2	22,5	24,8	22,5	23,0	23,8	24,8	25,0
<i>année</i>	1928	1929	1930	1931	1932	1933	1934	1935	1936	1937	1938
<i>moyenne</i>	17,33	17,40	16,84	16,63	16,60	17,09	16,89	16,68	17,12	17,62	17,78
<i>écart-type</i>	4,41	5,19	3,84	3,43	4,04	4,24	3,70	4,07	3,75	4,04	3,95
<i>minimum</i>	11,4	7,9	11,0	10,3	10,4	10,0	10,8	10,0	11,0	11,0	10,8
<i>maximum</i>	27,8	27,5	26,3	24,0	25,0	26,3	25,6	25,8	25,9	26,7	27,5
<i>année</i>	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949
<i>moyenne</i>	17,58	17,38	17,19	18,18	18,43	17,29	18,06	17,96	18,59	18,16	18,78
<i>écart-type</i>	3,83	3,89	3,99	4,30	3,91	4,17	4,19	3,83	4,71	3,55	4,50
<i>minimum</i>	12,0	9,0	9,8	10,6	12,8	11,1	10,5	11,4	9,8	11,9	11,5
<i>maximum</i>	26,3	26,0	28,8	26,2	26,7	28,0	27,9	27,9	29,9	26,5	27,2
<i>année</i>	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1895 à	avant	après	1925
<i>moyenne</i>	17,89	18,17	17,61	18,09	15,26	16,18	14,59		16,71	16,10	17,31
<i>écart-type</i>	4,16	4,01	4,55	4,08	2,97	3,35	3,42		3,61	3,29	3,81
<i>minimum</i>	11,9	12,1	10,2	10,8	9,0	10,4	7,6		9,1	9,9	9,1
<i>maximum</i>	26,0	25,4	28,5	27,5	22,9	23,8	21,3		25,5	25,2	25,5

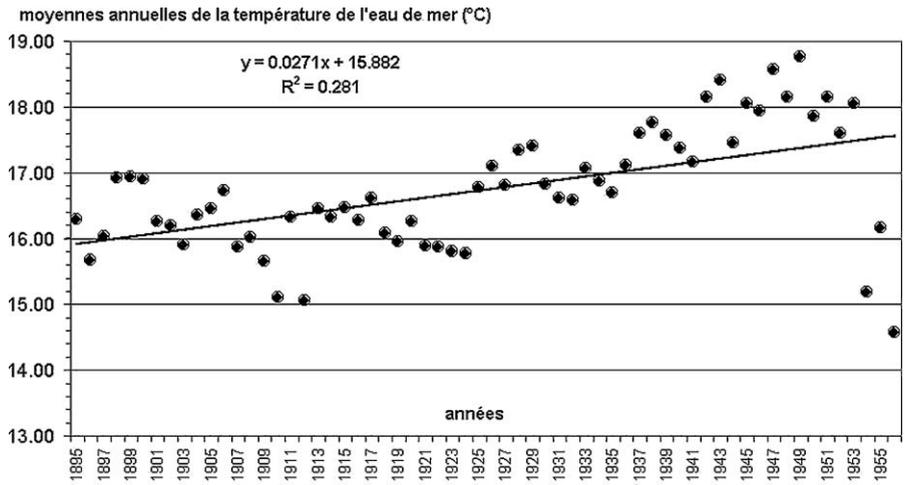


Fig. 1. Évolution des températures moyennes annuelles des températures de l'eau de mer entre 1895 et 1956.

Fig. 1. Evolution of surface-seawater temperature annual values from 1895 to 1956.

Sur l'ensemble de la série (Fig. 2), l'évolution des moyennes semi-annuelles pendant les mois froids (janvier à mai et décembre) et chauds (juin à novembre), confirme ce réchauffement dans les deux cas. Lors des mois froids, il est de +1,3 °C en 61 ans, plus faible que pendant le reste de l'année, mais très hautement significatif ($r = 0,552$; $n = 61$; $p < 0,001$). Pendant la période chaude, il est de +2,2 °C et aussi très hautement significatif sur la même période ($r = 0,493$; $n = 61$; $p < 0,001$).

Si l'on compare, pour tous les mois, de part et d'autre de l'année 1925 (médiane de la série), les moyennes mensuelles entre ces deux groupes d'années, on constate que, mis à part janvier (valeur proche du seuil $p_{0,05}$ de signification du risque de rejet de l'hypothèse nulle- H_0), toutes les autres moyennes mensuelles sont très significativement plus élevées dans la période 1925–1956 qu'entre 1895 et 1925 (avec souvent un risque de rejet

$p_{H_0} < 0,001$ en bilatéral). Ces différences varient de +0,24 °C en janvier à +2,71 °C en septembre. Ce n'est donc pas pendant les mois les plus chauds des deux périodes, juillet (moyennes respectivement de 20,86 °C et 21,99 °C) et août (de respectivement 20,86 °C et 22,24 °C), que cette différence est la plus grande (respectivement 1,13 °C et 1,37 °C), mais en septembre et octobre, avec des différences entre les deux périodes pour ces deux mois de +2,71 °C et +2,20 °C. Dans la Fig. 3, on note la bonne concordance de la dynamique annuelle entre, d'une part, les données du marégraphe rapportées ici pour respectivement les périodes 1895–1925 (a) et 1925–1956 (b) et, d'autre part, celle de températures actuelles de l'eau de mer (d). Sur la base de ces moyennes mensuelles, c'est lors des mois froids que les trois distributions sont les plus proches et pendant les mois chauds qu'elles divergent le plus, les moyennes mensuelles de 1895 à 1925 (b) étant

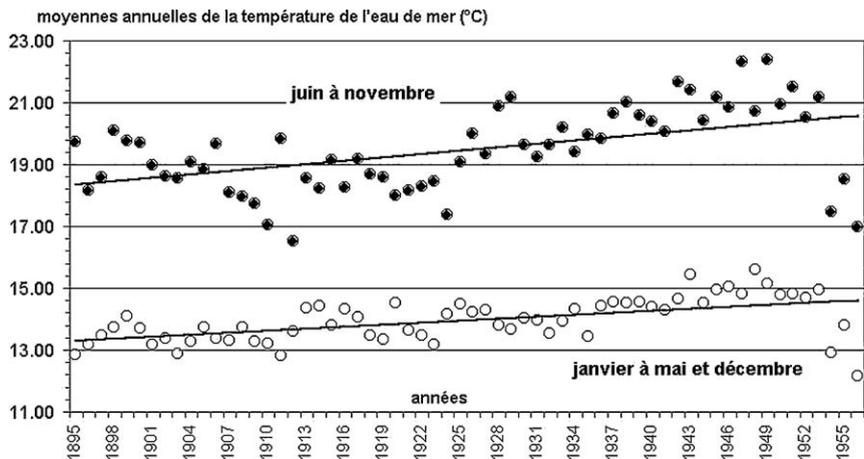


Fig. 2. Évolution des températures moyennes entre 1895 et 1956, pour les mois de juin à novembre (points noirs) et de décembre à mai (points clairs).

Fig. 2. Evolution of surface-seawater temperature half-annual values from 1895 to 1956: for June to November (black dots) and for December to May (clear dots).

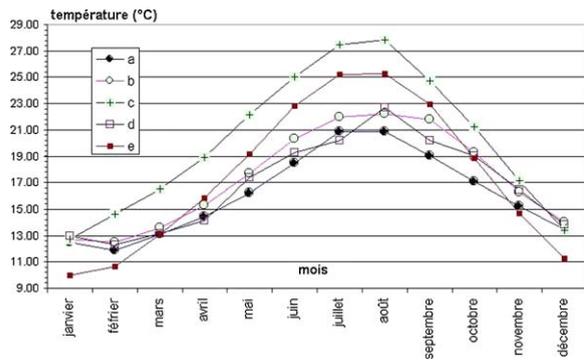


Fig. 3. Comparaison de cinq séries de moyennes mensuelles de température mesurées quotidiennement à Marseille : de l'eau de mer de surface, pour la série présentée ici (a) de 1895 à 1925 et (b) de 1925 à 1956 (b) ; (d) pour la période de 1996 à 2002 ; pour (e) la série publiée dans Romano et Lugrezi (2007). La courbe (c) représente la température de l'air de 1995 à 2002.

Fig. 3. Comparative evolution of monthly averaged temperatures from five series of daily records in the Marseilles area: surface seawater of the present paper from 1895 to 1925 (a) and from 1925 to 1956 (b) ; from 1996 to 2002 (d), and (e) the previous published series in Romano and Lugrezi (2007). The curve (c) corresponds to air temperature from 1995 to 2002.

plus proches des valeurs actuelles (d). Toutes trois sont nettement différentes des dynamiques des températures de l'air (c) et de celle précédemment publiée en Romano et Lugrezi (2007) à titre de comparaison. Pourtant, en ne sélectionnant pour les deux séries (celle présentée ici et celle publiée dans Romano et Lugrezi (2007)) que les années et les mois communs (1895–1956), la relation des moyennes annuelles entre ces deux séries (Fig. 4) est forte ($r = 0,522$; $n = 43$; $p < 0,01$), avec une pente proche de l'unité (0,9).

Quelques grandeurs statistiques annuelles sont d'ailleurs proches dans les deux séries : moyennes de respectivement $17,67^{\circ}\text{C}$ et $17,03^{\circ}\text{C}$, maxima absolus de

respectivement $29,8$ et $29,9^{\circ}\text{C}$ et valeurs moyennes des maxima annuels différents mais voisins, respectivement $28,0$ et $25,5^{\circ}\text{C}$. Par contre, les minima et la dispersion des valeurs sont significativement différents. Pour les minima, que l'on en calcule, la moyenne sur 43 ans (respectivement $5,9$ et $10,7^{\circ}\text{C}$) ou que l'on en extrait les minima annuels absolus (respectivement $0,4$ et $7,6^{\circ}\text{C}$), les températures hivernales sont toujours plus chaudes dans la série du marégraphe présentée ici. Au contraire, la dispersion des valeurs annuelles est nettement plus élevée dans la première série (écart-type de $5,9$), pour une valeur de $3,8$ dans la seconde.

4. Discussion

À la différence des interrogations exprimées dans Romano et Lugrezi (2007) à propos de la première série publiée du marégraphe, il s'agit, ici, réellement de températures de l'eau de mer de surface, mesurées à Marseille entre 1895 et 1956. Tout concourt à cette conclusion, et sans réticences cette fois. Certes, si l'on examine les courbes de la Fig. 3, les relevés actuels de température (d) apparaissent comme se superposant, presque en intermédiaire, entre les deux périodes de la série 1895–1956 de part et d'autre de l'année 1925, alors que l'on s'attendrait à que ces dernières soient plus basses. Mais cela tient vraisemblablement aux conditions de la mesure. Dans la série du marégraphe, l'eau de mer était sans doute prélevée dans la couche d'extrême surface. Les enregistrements en continu de la série CAPCOM proviennent, elles, de mesures réalisées à un emplacement et à une profondeur fixes (deux mètres de profondeur). Or, on sait l'importance du gradient de température dans l'eau de mer quand on s'approche de la surface, c'est-à-dire vers la limite d'échange avec l'atmosphère, qui présente une amplitude de variations en température beaucoup plus large que celle de l'eau de mer (Fig. 3, courbe c). À deux mètres de profondeur, les écarts de température sont déjà nettement atténués. C'est à ces modalités différentes de

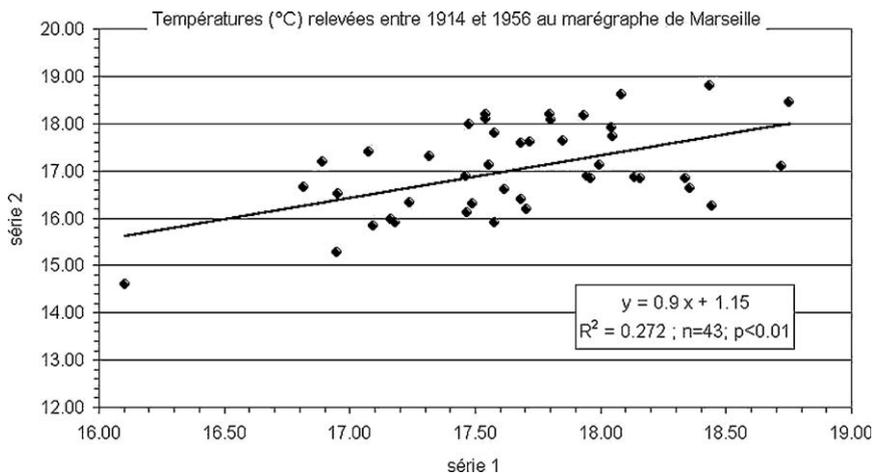


Fig. 4. Relation pour la période 1895–1956, des moyennes annuelles de température calculées (série 1) à partir de Romano et Lugrezi (2007) et à partir du présent travail (série 2).

Fig. 4. Relationship of annual temperature averages, during the 1895–1956 period between the previous published Romano and Lugrezi (2007) series 1 and the present data (series 2).

mesure, qu'il faut sans doute imputer cette imbrication entre les deux courbes, l'historique et l'actuelle. S'explique aussi le fait que, dans la première série publiée (Romano et Lugrezi, 2007), ce soient les minima qui soient plus faibles et la dispersion annuelle des valeurs plus forte que dans celle-ci. Ces minima hivernaux, trop faibles et surtout trop fréquents, avaient été signalés dans Romano et Lugrezi (2007) comme une anomalie et conduisait les auteurs à émettre l'hypothèse, que l'on sait aujourd'hui erronée (Coulomb, 2010), d'une mesure prise dans le puits du flotteur. Dans la présente série, on trouve des valeurs minimales aussi basses que 7,6 °C en 1956 ou 9,0 °C et 1905 ou, au contraire, des températures de l'eau de mer supérieures à 28,0 °C en 1941, 1944, 1947 et 1952 (Tableau 1). Mais ces valeurs sont exceptionnelles et correspondent à des années considérées d'ailleurs comme telles sur le plan météorologique général en France (Séchet, 2004). L'anse Calvo à proximité du marégraphe est peu profonde et en plein hiver, par contact avec l'air beaucoup plus froid, la température dans cette mince lame d'eau de mer doit sans doute pouvoir descendre en dessous de 10–11 °C, ou au contraire atteindre des températures très élevées lors des été chauds, et c'est bien ce que l'on constate. Quand nous comparons les mois d'enregistrement de température communs (12/1894 à 12/1899) à cette série et à celle de l'île du Planier, mesurés quotidiennement, dans les mêmes conditions (données non encore publiées), on constate en effet que dans cette dernière, les minima sont plus élevés (11,7 °C contre 10,4), les maxima plus faibles (23,3 °C contre 24,1), ainsi également que les écarts de distribution (3,1 contre 3,4). Or, à la différence de l'anse Calvo, la côte de l'île du Planier est accore et la profondeur de l'eau est de 5 à 6 m, à l'endroit où devait être prélevée l'eau pour les mesures (débarcadère).

Que nous apprend donc de nouveau cette série de températures d'eau de mer de surface enregistrées quotidiennement au marégraphe de Marseille, entre 1895 et 1956, sur le réchauffement climatique ? Rien qui n'infirme les conclusions de Romano et Lugrezi (2007), mais de nouvelles certitudes sur l'évolution thermique des eaux côtières méditerranéennes. La tendance au réchauffement des eaux littorales du bassin nord-occidental de la Méditerranée est clairement établie sur plus de soixante ans (quelles qu'en soient les causes que nous ne discuterons pas ici), et ceci, on le constate, pendant les mois froids comme pendant les chauds. Si l'on considère, sur la base des moyennes annuelles calculées ici qu'il est de +1,6 °C en soixante ans, c'est une estimation proche, mais légèrement plus faible, que celles établies sur une trentaine d'années à partir des séries actuelles de îles Medes (Bensoussan et al., 2009 ; Coma et al., 2009), de Villefranche-sur-mer et de l'île du Levant (Bensoussan et al., 2009) et qui convergent toutes trois vers une estimation d'environ +1 °C pour trente ans dans les eaux de surface de la Méditerranée nord-occidentale. L'absence, pendant plus de dix ans, de données fiables pour la température de l'eau de mer, entre la fin de cette série historique et le début de séries actuelles et actives ne nous autorise pas à extrapoler sur une accélération du réchauffement dans la seconde moitié du xx^e siècle. Et

ce, d'autant plus que l'information apportée par cette série s'arrête à 1956, année historiquement très froide, précédée des années 1954 et 1955 accusant, elles aussi, une chute brutale de la température comme en témoignent les points des Fig. 1 et 2. Mais rien n'interdit non plus de tenter, dans le futur, une extrapolation de cette évolution à partir de la série publiée dans Romano et Lugrezi (2007), la très bonne corrélation constatée entre les deux séries (Fig. 4) nous y autoriserait, et ceci pour essayer de joindre la fin de cette série au début des actuelles. Quand on connaît la faible documentation historique disponible des données d'évolution de la température de la mer pour la Méditerranée nord-occidentale, cela nous semble un enjeu à prendre en considération.

Par le précédent article (Romano et Lugrezi, 2007), les lecteurs étaient induits en erreur, non pas sur l'interprétation des données, mais sur leur origine (Coulomb, 2010). Mais la comparaison de ces deux séries montre que cela ne remet pas en cause les conclusions tirées alors sur la tendance au réchauffement. Cela les conforte, au contraire, en couplant les températures de l'eau de mer de surface à celle de la température de l'air sur la même longue période et avec la même fréquence de mesures. Les auteurs, Romano et Lugrezi (2007) écrivaient alors en conclusion de leur article que cette série « 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 », mais ils complétaient malheureusement par « d'une eau de mer, confinée certes, mais une température de l'eau de mer de surface néanmoins ». Dans ces derniers mots était l'erreur. Les présentes données en sont une correction.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier M. Alain Coulomb de l'IGN pour ses renseignements utiles et pour avoir permis la numérisation sur place des documents originaux et la mise à disposition du matériel nécessaire.

Références

- Bensoussan, N., Romano, J.C., Harmelin, J.G., Crisci, C., Pascual, J., Garra-bou, J., 2009. Warming trends, regional fingerprints and future trajectories of NW Mediterranean coastal waters, 1st symposium on Mediterranean coralligenous, Tabarka, Tunisia.
- Bensoussan, N., Romano, J.C., Lafont, M., El-Haikali, B., 2004. Importance du choix des échelles de temps pertinentes pour l'étude du fonctionnement d'écosystèmes marins littoraux. C. R. Geoscience 336, 909–918.
- Bethoux, J.P., Gentili, B., Raunet, J., Tailleux, D., 1990. Warming trend in the western Mediterranean deep water. Nature 347, 660–662.
- Coma, R., Ribes, M., Serrano, E., Jimenez, E., Salat, J., Pascual, J., 2009. Global warming-enhanced stratification and mass mortality events in the Mediterranean. PNAS U S A 106 (15), 6176–6181.
- Coulomb, A., 2010. Relevés de températures au Marégraphe de Marseille. C.R. Geoscience 342, 75–78.
- Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Stephens, C., 2000. Warming of the world ocean. Science 287, 2225–2229.
- Pascual, J., Salat, J., Palau, M., 1995. Evolucion de la temperatura del mar entre 1973 y 1994, cerca de la costa catalana, in: Int. Coll. Okeanos, Montpellier, France, 1995, pp. 23–8.
- Romano, J.C., Lugrezi, M.C., 2007. Série du marégraphe de Marseille : mesures de températures de surface de la mer de 1885 à 1967. C. R. Geoscience 339, 57–64.

- Romano, J.C., Bensoussan, N., Younes, W.A.N., Arlhac, D., 2000. Anomalie thermique dans les eaux du golfe de Marseille durant l'été 1999. Une explication partielle de la mortalité d'invertébrés fixés ? C. R. Biologies 323, 415–427.
- Rouch, J., 1940. La température et la densité de l'eau de mer à Marseille. C. R. Acad. Sci. Paris 211, 854–857.
- Séchet, G., 2004. Quel temps ! Chronique de la météo de 1900 à nos jours Éditions Hermé, Paris, France, 255 p.
- Travers, M., Travers, A., 1972. 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. Tethys 4 (3), 515–534.