

# Les oscillations propres de la rade de Toulon

Seiches  
Courant et niveau de la mer  
Analyse spectrale

Seiches  
Current and sea level  
Spectral analysis

C. Millot <sup>a</sup>, R. Broyard <sup>b</sup>, O. Metais <sup>b</sup>, J. Tine <sup>c</sup>.

<sup>a</sup> Antenne du Laboratoire d'Océanographie Physique du Muséum National d'Histoire Naturelle, B.P. 2, 83501 La Seyne Cedex.

<sup>b</sup> École Nationale Supérieure d'Hydraulique de Grenoble, B.P. 53, 38041 Grenoble Cedex.

<sup>c</sup> Section de Surveillance du Site, Majorité Générale, BP n° 61, 83800 Toulon Naval.

Reçu le 20/1/81, révisé le 20/3/81, accepté le 2/4/81.

## RÉSUMÉ

Les seiches de la rade de Toulon sont étudiées avec l'analyse spectrale simple et croisée de mesures de niveau et de courant obtenues en différents points. Les relations de phase entre les enregistrements sont très précises et elles permettent une bonne définition des principales caractéristiques de quatre oscillations propres.

*Oceanol. Acta*, 1981, 4, 3, 259-262.

## ABSTRACT

The seiches of the rade de Toulon.

This local study of standing wave oscillations is based on sea level and current measurements obtained at three and two locations respectively. We have used a very powerful tool which is the spectral and cross-spectral analysis of time series. Phase relationships between the records are very accurate and permit a good definition of many of the characteristics of four natural oscillations occurring in the studied area.

*Oceanol. Acta*, 1981, 4, 3, 259-262.

## INTRODUCTION

Les marégrammes obtenus dans la rade de Toulon (fig. 1) montrent l'existence quasi permanente d'oscillations dont les fréquences sont de l'ordre du cycle par heure (cph), (fig. 2). Ces signaux sont probablement associés à des seiches car les dimensions caractéristiques de la rade sont  $H \sim 10$  à  $50$  m et  $L \sim 5$  à  $10$  km. La séparation entre la Grande Rade et la Petite Rade est visualisée par la Grande Jetée, digue dont la perméabilité est mal connue. Cette digue n'est pas reliée à la côte : la Grande Passe au Sud ( $L \sim 600$  m et  $H \leq 25$  m) a une section beaucoup plus grande que la Petite Passe au Nord ( $L \sim 100$  m et  $H \leq 10$  m).

Nous disposons de 2 marégraphes OTT et d'un courantomètre Aanderaa. En admettant que certaines caractéristiques de ces oscillations propres sont permanentes, on a pu obtenir des mesures en plusieurs points. Au cours d'une 1<sup>re</sup> expérience (juillet-août 1980), on a mesuré le niveau en A et B et le courant en G; pendant une

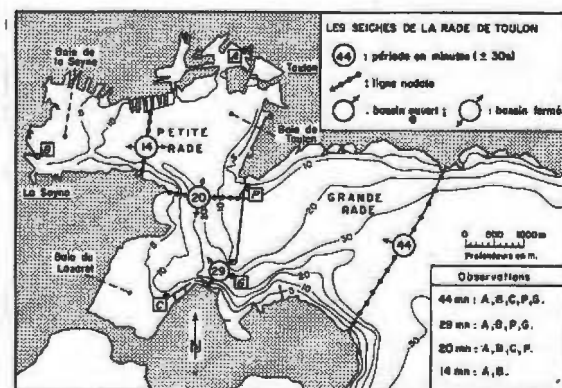


Figure 1

Plan de la rade de Toulon, position des points de mesure du niveau (A, B, C) et du courant (P, G), et caractères schématisés des oscillations propres.

Map of the rade de Toulon, location of the sea level (A, B, C) and current (P, G) recorders, and schematic features of the seiches.

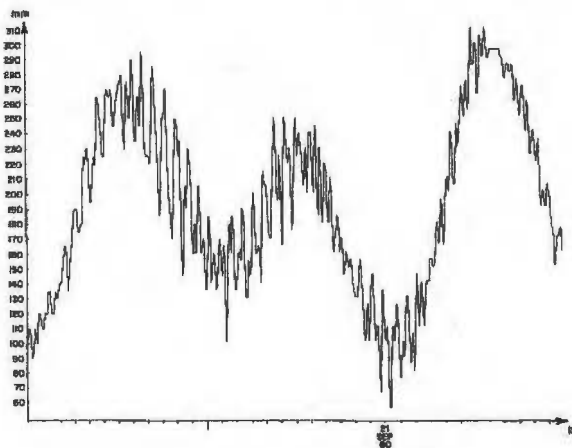


Figure 2

Signal au point B reconstitué avec un pas de temps de 5 minutes (échelle des temps en heures). On note l'existence de différents signaux dont les fréquences sont  $> 1$  cph.

*Sea level at B, recomposed with a 5 minutes sampling interval (time scale in hours). Note the existence of different high frequency signals ( $> 1$  cph).*

2<sup>e</sup> expérience (septembre-octobre 1980), on a mesuré le niveau en B et C et le courant en P (fig. 1). Pour chaque expérience, nous n'avons analysé l'ensemble des enregistrements que pendant 96 et 64 heures respectivement à cause des difficultés de dépouillement des mesures de niveau.

L'enregistrement analogique des marégraphes (rapport d'amplitude de 1/5) est obtenu par la rotation d'un tambour qui fait un tour en 24 heures, soit un tracé de 16 mm/h. Pour définir les ondes alors mises en évidence (fig. 2), un pas de 5 minutes a été choisi. Au cours de chaque expérience, les variations du niveau ayant les plus fortes amplitudes ont été enregistrées (fortuitement) sur une seule feuille pendant plusieurs jours. Les différentes sources d'erreur propres aux marégraphes ont entraîné un écart, entre l'heure de la fin de l'enregistrement définie d'après l'échelle des temps de la feuille et l'heure exacte, mais cet écart étant toujours inférieur à 5 minutes, l'échelle des temps correspondant aux graduations du papier est considérée comme bonne. La figure 2 représente en fait une partie de l'enregistrement reconstitué au point B.

Le courantomètre, inséré sur un mouillage très court de type sub-surface, était à environ 1 m du fond. Il a été immergé par  $\sim 25$  et 10 m de fond en G et P, où on a obtenu 28 et 35 jours de mesures avec un pas d'échantillonnage de 5 minutes. En chaque point, la composante E-W est beaucoup plus importante que la composante N-S, mais dans ces passes pourtant relativement étroites, les histogrammes du cap ont des pics assez étalés : le courant a un axe dominant ( $100$ - $280^\circ$  en P et  $130$ - $310^\circ$  en G), mais même les axes perpendiculaires apparaissent de manière significative. On peut cependant considérer que les modules de la vitesse et la composante E-W sont en phase. En G, des signaux hautes-fréquences sont observés avec une amplitude plus ou moins grande mais pratiquement en permanence. Cette caractéristique est encore plus évidente en P (fig. 3) où de tels signaux ont parfois 30 cm/s d'amplitude.

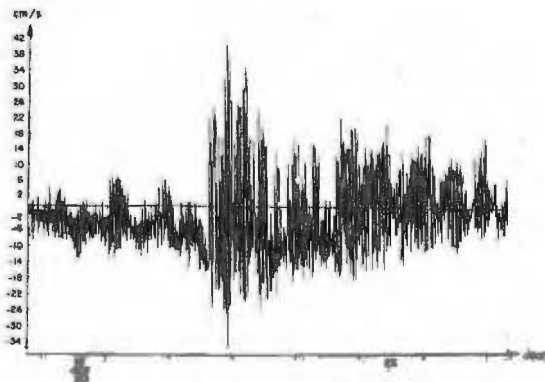


Figure 3

Par 10 m de fond en P, les signaux hautes fréquences dans la composante E-W sont relativement importants, et on les observe pratiquement en permanence.

*At P (10 m depth), high frequency signals in the E-W component are relatively large and virtually constant.*

## ANALYSE SPECTRALE DES ENREGISTREMENTS

L'étude statistique faite avec les spectres d'énergie de chaque enregistrement et avec les relations de cohérence et de phase entre les enregistrements a été complétée en utilisant des filtres passe-bande et en comparant *de visu* les signaux ainsi recomposés (Lamy *et al.*, 1981).

### Spectres des enregistrements du niveau

Les spectres obtenus au point B pendant chaque expérience (fig. 4a et 4c) sont relativement semblables et présentent des pics pour des fréquences  $> 1$  cph. Les plus importants sont centrés sur des périodes de  $\sim 45$  minutes et  $\sim 20$  minutes, mais deux pics apparaissent à  $\sim 30$  minutes et  $\sim 15$  minutes. Les spectres en B montrent qu'en général, il y a plus d'énergie pendant la 1<sup>re</sup> expérience que pendant la 2<sup>e</sup>.

Au point A (fig. 4b), le pic à 45 minutes a la même amplitude qu'en B (fig. 4a), les pics à 30 minutes et surtout 20 minutes sont moins importants, mais le pic à 15 minutes est plus large et le niveau de bruit plus élevé qu'en B. La localisation du point A au fond de bassins

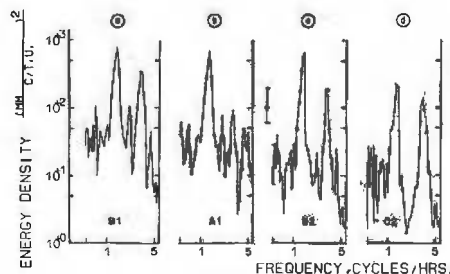


Figure 4

Spectres des niveaux enregistrés en B et A (4a et 4b) et en B et C (4c et 4d). Les estimateurs sont moyennés sur environ 10 fréquences adjacentes : l'intervalle de confiance à 95 % montre que tous les pics sont significatifs.

*Sea level spectra at B and A (4a and 4b) and at B and C (4c and 4d). Estimates are averaged over 10 adjacent frequencies: the 95% confidence interval shows that all the peaks are significant.*

(fig. 1) peut expliquer une grande partie des différences avec les mesures obtenues en B, mais il est évident que l'amplitude des seiches dans les baies de Toulon et de La Seyne peut être différente.

Au point C (fig. 4 d), le pic à 45 minutes est moins important qu'en B (fig. 4 c), et le pic à 30 minutes n'existe pas. Le pic à 20 minutes est moins haut mais plus large que le pic en B, sans toutefois pouvoir masquer un éventuel pic à 15 minutes; le niveau de bruit est le même qu'en B. Notons que le point C se trouve au bout d'un quai sur pilotis et qu'il occupe, comme le point B, une position relativement dégagée.

**Spectres des enregistrements du courant**

Pour des raisons techniques, nous ne présentons que le spectre en échelle linéaire et pour des fréquences > 1 cph, de la composante E-W mesurée pendant un mois en P (fig. 5); principalement à cause de la section des passes, le signal en P est beaucoup plus énergétique et les pics sont mieux définis qu'en G. Le pic à 45 minutes apparaît nettement sur chaque spectre. Le pic à 30 minutes est plus énergétique en P, mais relativement au pic à 45 minutes, il est 2 fois plus énergétique en G. Le pic à 20 minutes n'apparaît qu'en P, alors que le pic à 15 minutes n'apparaît ni en P ni en G.

Les valeurs des fréquences propres, déterminées à partir de l'enregistrement du courant en P, sont : 1,37, 2,09 et 2,94 cph, soient des périodes de 44, 29 et 20 minutes (± ~30 secondes). On retrouve exactement ces valeurs en B par exemple, et la 4<sup>e</sup> fréquence propre est 4,20 cph (14 minutes ± ~30 secondes).

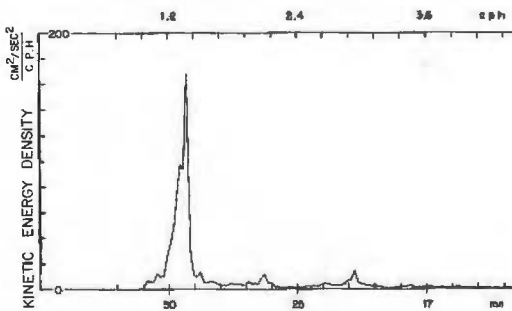


Figure 5  
Spectre de la composante E-W en P : les pics à 45, 30 et 20 minutes sont bien définis. Pour une valeur calculée de 1, l'intervalle de confiance à 95 % est défini par les valeurs 1,55 et 0,70.  
*The E-W component spectrum at P: the peaks at 45, 30 and 20 minutes are well defined. If the computed value is 1, the 95% confidence interval is bounded by 1.55 and 0.70.*

**Cohérences**

La recherche des déphasages entre différents enregistrements, pour des périodes allant jusqu'à 15 minutes alors que le pas d'échantillonnage est de 5 minutes, nécessite un calage en temps très rigoureux. Les erreurs de manipulation des marégraphes ne permettent pas une précision suffisante, mais l'horloge du courantmètre est très précise : on a donc cherché à caler dans le temps chaque enregistrement du niveau par rapport à

l'enregistrement du courant. En effet, le caractère stationnaire des ondes implique dans un modèle à une dimension, que les niveaux mesurés en différents points sont déphasés de 0 ou de π, et que ces niveaux sont en avance sur les courants de π/2 ou de π/2 + π. L'analyse de cohérence faite avec les heures données par les opérateurs montre que pour l'onde à 45 minutes, tous les signaux sont approximativement en phase, et tous sont en avance sur le courant de π/2 approximativement : nous avons donc modifié l'heure associée aux enregistrements du niveau pour qu'à la période de 45 minutes, chacun d'eux soit en avance sur le courant de π/2 exactement.

PERIODES APPROX en mn	(a) PHASES ET COHERENCES CALCULEES	(b) PHASES ET PRECISION RETENUES
45		
30		
20		
15		

Figure 6  
a : Relations de cohérence et de phase calculées entre les différents enregistrements. Il y a une probabilité (à 95 %) de relation non nulle entre deux séries lorsque la valeur de cohérence est > 0.50 (B-A-G) ou > 0.61 (B-C-P) (Koopmans, 1974).  
b : Déphasages obtenus en calant, pour les signaux à 45 minutes, les niveaux en avance sur les courants de 90° exactement. L'intervalle de confiance à 95 % des déphasages est fonction de la cohérence (Jenkins, Watts, 1968). On a aussi indiqué les déphasages retenus.  
a : *Cohérence and phase relationships between the different records. The 95% critical values for the test of null hypothesis are 0.50 (B-A-G) and 0.61 (B-C-P), (Koopmans, 1974).*  
b : *Phase-lags computed when the sea level signals in the vicinity of 45 minutes lead the current by exactly 90°. The 95% confidence interval for these phase-lags depends on the coherence (Jenkins, Watts, 1968). Also mentioned are the exact values of the phase-lags.*

On a représenté par des « triangles de cohérence » les relations de phase entre les points B, A, G et B, C, P, pour les périodes voisines de 45, 30, 20 et 15 minutes. On a porté sur la figure 6 a les valeurs de cohérence et de phase calculées à partir des heures données par les observateurs, et sur la figure 6 b les valeurs de phase qui ont été retenues et leur précision. Sur la figure 6 a, une notation telle que  $B \xrightarrow[0,75]{18^\circ} A$  pour 20 minutes par exemple indique une cohérence de 0,75 entre les signaux au voisinage de 20 minutes mesurés en A et B, les signaux en B étant statistiquement en avance de 18° (soit 20 × 18/360 = 1 minute) sur ceux mesurés en A. Sur la figure 6 b, une notation telle que  $B \xrightarrow[0^\circ]{1 \pm 13^\circ} A$  indique que la phase est probablement comprise dans l'intervalle 1 ± 13°; l'intervalle de confiance à 95 % comprend généralement la valeur exacte qui est 0° dans ce cas. Des valeurs de cohérence significatives sont parfois obtenues pour deux fréquences voisines des fréquences propres : on a alors porté les valeurs moyennes de la phase et de la cohérence avec un seul chiffre significatif.

## DISCUSSION

**Onde à 45 minutes**

A cette fréquence, chaque niveau étant arbitrairement calé de  $90^\circ$  en avance sur le courant, il apparaît que tous les niveaux sont très précisément en phase. L'amplitude de cette onde est pratiquement la même en A et B, alors qu'elle est légèrement inférieure en C. Ces éléments définissent le 1<sup>er</sup> mode d'oscillation de l'ensemble Grande Rade plus Petite Rade (fig. 1) : en effet les points A, B et C sont du même côté de la ligne nodale qui doit être suffisamment éloignée de C si on considère l'amplitude assez forte de l'onde en ce point.

**Onde à 30 minutes**

Cette onde n'est pas observée en C, les niveaux en A et B sont en phase et en avance sur les courants en P et G de  $\pi/2$ ; le courant en G est relativement important. Ces éléments définissent le 1<sup>er</sup> mode d'oscillation de la Petite Rade, avec une nodale localisée au voisinage du point C (fig. 1).

**Onde à 20 minutes**

Les niveaux sont en phase entre A et B alors qu'ils sont en opposition de phase entre B et C; l'amplitude est plus forte en C qu'en B, celle-ci étant plus forte qu'en A. Le courant en G est en avance sur le niveau en A et B de  $\pi/2$  et le courant en P est en avance sur le niveau en C de  $\pi/2$ . On admet que le courant en P est en avance sur le niveau en B de  $(\pi/2) + \pi$ , car cette valeur théorique est comprise dans l'intervalle de confiance à 99 % ( $235 \pm 40^\circ$ ). Ces éléments définissent une oscillation de la Petite Rade comme un bassin fermé, avec une nodale à peu près perpendiculaire à la Grande Jetée, et qui sépare la baie du Lazaret au Sud, des baies de La Seyne et de Toulon au Nord (fig. 1). Par exemple, lorsque le niveau monte en C, il baisse en A et B, et le courant porte vers le Sud au niveau de la ligne nodale, vers l'Ouest en G et vers l'Est en P. Les oscillations du niveau (montée ou baisse) dans chaque moitié de la Petite Rade correspondent donc à des courants de même type (flux ou reflux), au niveau de la ligne nodale mais aussi au niveau de la passe associée à chaque moitié.

**Onde à 15 minutes**

Le signal est en opposition de phase entre A et B, et il n'apparaît ni en C, ni en P, ni en G. Ces éléments définissent l'oscillation du système baie de Toulon-baie de La Seyne, avec une ligne nodale orientée N-S (fig. 1). L'ensemble des signaux se manifeste pratiquement en permanence, mais leur amplitude présente une forte

variabilité. Cette variabilité n'est pas périodique, ce qui exclut l'excitation des seiches par les ondes de marée; aucune relation n'existe avec la manifestation des coups de vent. Il est par contre évident que ces oscillations propres sont déclenchées principalement par des variations de la pression atmosphérique à petite échelle, liées à une importante activité orageuse.

## CONCLUSION

L'analyse spectrale de mesures de niveau et de courant permet de montrer l'existence de quatre modes propres d'oscillation de la rade de Toulon. Les périodes sont de 44, 29, 20 et 14 minutes ( $\pm \sim 30$  secondes).

Ces signaux apparaissent très clairement sur des enregistrements du courant : c'est une observation élémentaire que jusqu'à présent, nous n'avons pas trouvée dans la bibliographie sur les seiches.

On a pu préciser certaines caractéristiques de ces seiches car les déphasages calculés entre les enregistrements sont toujours très proches des valeurs théoriques obtenues en considérant des ondes stationnaires dans un modèle à une dimension.

Cette étude montre que les enregistrements d'apparence rudimentaire que sont les marégrammes peuvent fournir des renseignements intéressants lorsqu'on dispose d'un outil aussi puissant que l'analyse spectrale.

## Remerciements

Ce travail a été réalisé en particulier avec l'aide des plongeurs de la Section de Surveillance du Site. Nous remercions la Direction de la Base Océanologique de Méditerranée (BOM) du Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO) pour les diverses facilités qui nous ont été accordées. Les calculs ont été effectués au Centre d'Essais de la Méditerranée, que nous remercions également. Les conseils des arbitres ont été vivement appréciés.

## RÉFÉRENCES

- Jenkins G. M., Watts D. G., 1968. *Spectral analysis and its applications*, Holden Days, 525 p.
- Koopmans L. H., 1974. *The spectral analysis of time series*, New York Academic Press, 366 p.
- Lamy A., Millot C., Molines J. M., 1981. Bottom pressure and sea level measurements in the Gulf of Lions, *J. Phys. Oceanogr.*, **11**, 3.