



Seiches à l'échelle de baies : origines et identification des périodes propres d'oscillations à partir des données d'observations sur le long terme en Provence à partir du réseau HTM-NET

Vincent REY¹, Caroline PAUGAM², Christiane DUFRESNE³,
Didier MALLARINO¹, Tathy MISSAMOU¹, Jean-Luc FUDA¹

1. Université de Toulon, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, 83041 Toulon Cedex 09, France.
Aix Marseille Université, CNRS/INSU, IRD, Mediterranean Institute of Oceanography (MIO), UM 110, 13288 Marseille, France.
rey@univ-tln.fr
2. DHI Water and Environment, Singapore.
3. Arctus, 101, rue Lavoie, #8, Rimouski, Québec, G5L 5Y2, Canada.

Résumé :

L'étude présentée sur les oscillations résonantes dans des bassins semi-ouverts de la côte provençale est basée sur l'analyse des données de niveaux issus de stations du réseau d'observation HTM-NET, composées de deux capteurs piézométriques, l'un immergé et l'autre émergé, permettant de connaître la pression atmosphérique, le niveau d'eau et la température avec une période d'échantillonnage de 2 min. Elle concerne les baies de La Ciotat, de Sanary, la Rade de Toulon (grande et petite rades), le Golfe de Giens et la Rade d'Hyères. Des oscillations des bassins, d'autant plus marquées qu'ils sont peu ouverts vers le large, sont identifiées. Des exemples d'occurrence de ces seiches au cours de ces deux dernières années sont présentées pour des origines diverses : états de mer associées à des tempêtes, météo-tsunami, tsunami. Les périodes de ces oscillations, comprises entre une dizaine de minutes et une heure, dépendent de la configuration des baies, chacune répondant à sa ou ses fréquences propres aux différents forçages. Les variations de niveau observées, pouvant dépasser 40 cm, contribuent aux risques de submersion, d'inondation et d'érosion. L'observation sur le long terme permet d'évaluer les causes et les risques potentiels de ces phénomènes de résonance.

Mots-clés : Réseau d'observation, Niveaux d'eau, Oscillations résonantes, Baies.

1. Introduction

Le littoral Provence-Côte d'Azur présente des caractéristiques très variées (plages sableuses, côtes rocheuses, bathymétries fortement variables, archipels), une exposition diverse aux tempêtes et une forte anthropisation. Les risques de submersion et d'inondation liés aux épisodes extrêmes météo-marins sont très liés aux surcotes marines

Thème 7 – Risques côtiers

associées. Les données de niveau d'eau sur le long terme sont généralement issues des marégraphes implantés dans les grands ports le long du littoral depuis de nombreuses années (Marseille ou Toulon en Provence). Installés dans des zones abritées, ils permettent d'avoir une information précise des évolutions des niveaux à très basse fréquence (période supérieure à l'heure), et de leurs causes à grande échelle (marée, effets barométriques, effets stériques, ...). A ces origines globales peuvent s'ajouter des causes plus locales, liées au vent et/ou aux états de mer, et associées à la configuration des sites. Une analyse détaillée de l'aire toulonnaise (REY *et al.*, 2020) à partir de données du réseau HTM-NET (<https://htmnet.mio.osupytheas.fr/>) avait montré que les niveaux d'eau mesurés à cette échelle dans des zones abritées de la houle restaient sensiblement les mêmes, les différences de niveaux en présence de vent entre la Petite rade de Toulon (en fond de baie) et de Port Cros (au « large »), ne dépassant pas 0.10 m, d'un ordre inférieur aux principales causes de variations de niveau, la marée (environ 0.20 m) et l'effet barométrique inverse (environ 0.50 m par régime dépressionnaire). Toutefois, ces variations peuvent être beaucoup plus significatives pour des plans d'eau peu profonds et semi-fermés, comme lors de basculements de plan d'eau par vent fort comme observés dans l'étang de Berre ou de Vaccarès (PAUGAM *et al.*, 2021).

A ces mouvements lents de la surface libre s'ajoutent les oscillations ou seiches, dont les périodes propres, bien identifiées, sont imposées par la configuration des bassins, leurs dimensions et leur profondeur. Ce sont des ondes longues, de période de l'ordre de quelques minutes à quelques dizaines de minutes, aux conséquences potentiellement importantes, que ce soit à cause des variations de niveaux pouvant conduire à des phénomènes de submersion ou d'inondation, ou par les courants induits, notamment au voisinage des nœuds de ces ondes stationnaires. Dans les ports, elles peuvent causer des dommages conséquents sur les structures et les bateaux amarrés. Dans les baies, elles peuvent amplifier les risques de submersion et d'érosion, en modifiant l'impact des houles à la côte. Ces oscillations à basse ou très basse fréquence, souvent directement associées aux états de mer incidents à la côte, jouent en effet un rôle significatif dans la dynamique littorale (LASHLEY *et al.*, 2018). La périodicité de mesure des marégraphes est d'aujourd'hui de l'ordre de la minute, ce qui permet un bon échantillonnage de signaux dans la gamme 10-30 minutes.

Si certains grands ports sont dotés de marégraphes depuis de nombreuses années, l'ensemble des baies semi-ouvertes du littoral ne bénéficient pas de ces données de niveau sur le long terme. L'étude que nous proposons ici s'attache à identifier les seiches et leurs origines, sur le littoral provençal entre La Ciotat et les îles d'Hyères. Le niveau d'eau dans la rade de Toulon est mesuré depuis de nombreuses années par le marégraphe du Shom, situé aujourd'hui dans la darse des Sous-marins. Le réseau HTM-NET, dont la période de mesure a été réduite à 2 min en 2019, et pour lequel de nouvelles stations ont été installées entre le Cap Couronne (ainsi que l'étang de Berre) à l'ouest et Menton à l'est, permet d'apporter des informations complémentaires dans la Rade (stations

Brégaillon/Ifremer, Tamaris, Lazaret, Port-Saint Louis du Mourillon, Port des Oursinières) mais aussi pour les baies de La Ciotat (station La Ciotat), de Sanary (Le Brus), le golfe de Giens (Giens) et la rade d'Hyères (La Capte, Porquerolles, Port-Cros). Les stations dans la zone étudiée ici sont indiquées sur la figure 1. Elles mesurent la température de l'eau, la pression atmosphérique et la pression dans l'eau. Le niveau d'eau est déduit des données de pression (REY et al, 2020). Les données météorologiques (notamment le vent) utilisées pour l'analyse sont fournies par Météo-France.

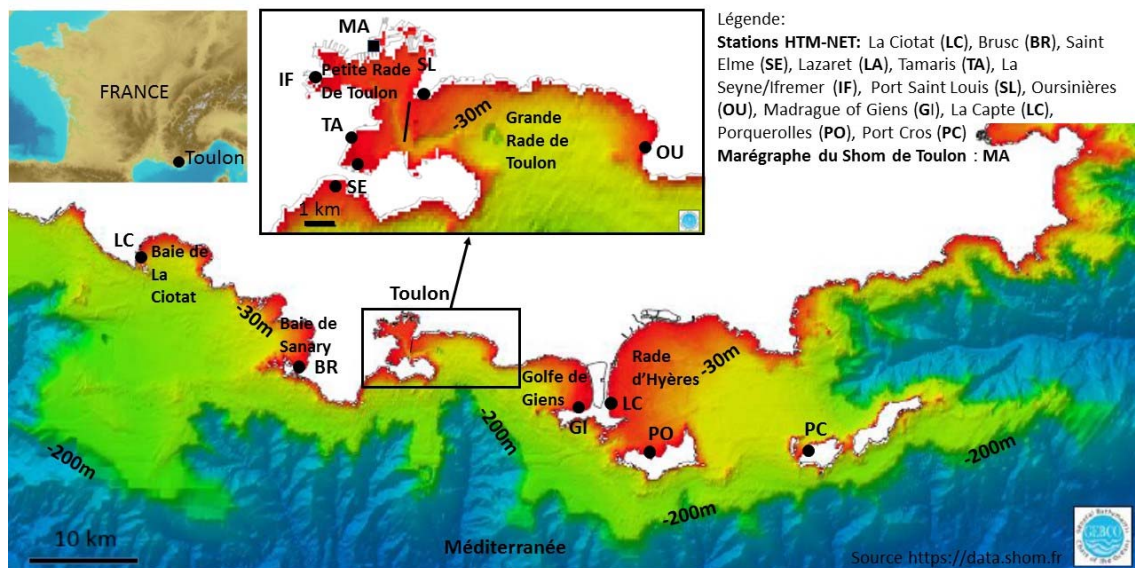


Figure 1. Implantation des instruments.

2. Fréquences propres des baies

2.1 Les seiches

Les seiches sont des oscillations résonantes, observées dans des bassins semi-ouverts ou fermés. Les ondes sont longues et se propagent à la vitesse $c = \sqrt{gh}$ où g est l'accélération due à la gravité et h la profondeur d'eau. Pour des bassins fermés, les conditions de résonance correspondent à des ventres d'oscillations sur le pourtour du bassin. Lorsque le bassin est ouvert, la condition de résonance impose un nœud d'oscillation en entrée. Pour des géométries simples, des formules sont proposées pour les périodes propres (RABINOVICH, 2009). Pour une baie semi-fermée circulaire, de bathymétrie paraboloidale, de distance L entre le fond et l'entrée de la baie et de profondeur h à l'entrée, la période T du mode fondamental est donnée par

$$T = 2.220 \frac{2L}{\sqrt{gh}} \quad (1)$$

Thème 7 – Risques côtiers

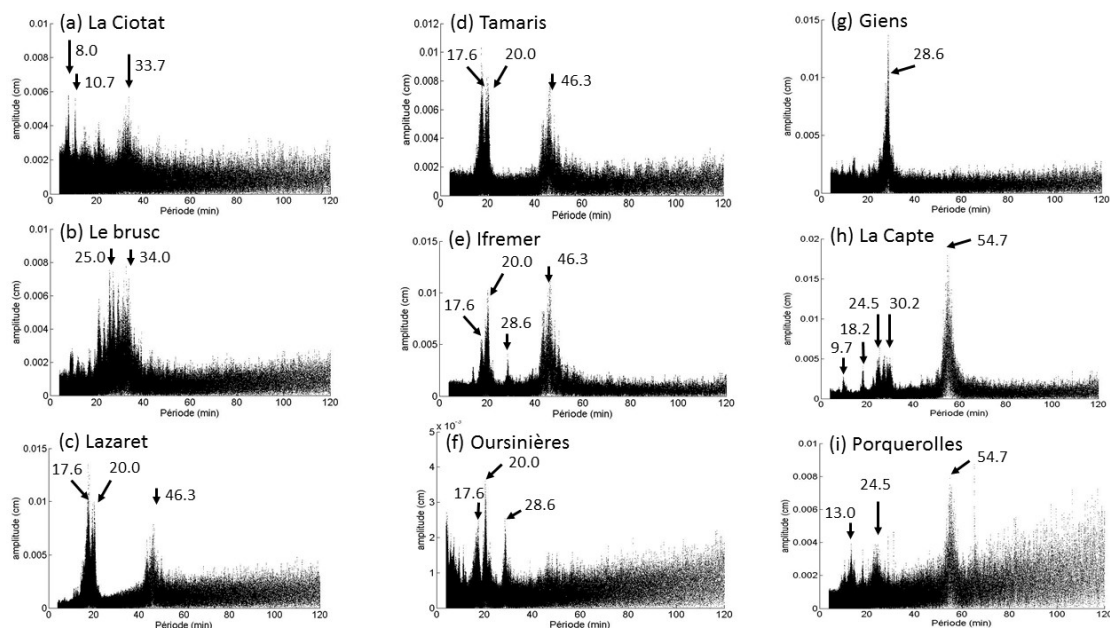


Figure 2. Identification de fréquences propres par FFT au niveau des stations.

Les variations de niveau observées sur les sites sont de l'ordre d'1 m. Pour une profondeur d'eau de 10m, la période relative des seiches peut ainsi varier de 5% environ selon le niveau d'eau.

Les seiches sont des phénomènes transitoires, d'une durée variant généralement de quelques heures à quelques jours. De façon générale, de tels phénomènes peuvent être analysés à l'aide d'une transformation de Fourier à court terme ou par ondelettes. En fait, une méthode simple et rapide d'analyser la présence d'éventuelles fréquences propres d'une oscillation d'une baie est de calculer la Transformée de Fourier Rapide (FFT) du niveau d'eau sur une longue série temporelle. Les coefficients de Fourier ainsi calculés pour chaque composante fréquentielle feront apparaître les fréquences propres. Les amplitudes n'auront cependant pas de signification puisque une sinusoïde d'amplitude donnée présente sur une fraction de la durée du signal donnera lieu à une amplitude beaucoup plus faible que sa valeur effective par ce mode de calcul. Toutefois, une fois une fréquence propre identifiée, un calcul des coefficients de Fourier correspondant à cette période par une transformation de Fourier à court terme permettra d'identifier les moments de présence de cette seiche et son amplitude. On a représenté sur les figures 2a à 2i les spectres pour les stations HTMNET de La Ciotat à Porquerolles.

Les Baies de La Ciotat et de Sanary sont largement ouvertes. La gamme de périodes pour laquelle l'énergie est la plus significative, mais assez faible, se situe autour de $T=33.7$ min pour La Ciotat (figure 2a), et dans la gamme $T=25-34$ min pour Sanary (figure 2b). Des pics moins significatifs sont également observés à plus faible période pour ces deux baies.

La Rade de Toulon bénéficie de plusieurs stations de mesure, dans la Grande Rade et le Petite Rade (voir figure 1). On observe des pics d'énergie importants autour de $T=17.6$ min et $T=46.3$ min, en accord avec les observations de MILLOT et al (1981), au niveau des stations de la Petite Rade (voir figures 2c, 2d et 2e). La station des Oursinières (figure 2f) est caractérisée par des pics d'énergie beaucoup plus faibles. Si on retrouve ceux autour de 17-20 min, celui à 46.3 min est absent, mais un pic à 28.6 min est présent tout comme à la station Ifremer. La configuration complexe et en partie partiellement fermée de la Rade de Toulon est propice à différents modes de résonance. Une analyse détaillée des stations de la Rade de Toulon est présentée dans PAUGAM (2021). Les oscillations les plus significatives correspondent à une oscillation de type bassin fermé dans la petite Rade pour $T=19-20$ min et en bloc dans la Petite Rade pour $T=45$ min.

Le Golfe de Giens est de forme quasiment circulaire, la distance entre le fond de la baie et l'entrée (environ 7 km) est légèrement plus importante que sa largeur à l'entrée (environ 5 km). Sa profondeur à l'entrée de la baie est d'environ 50 m. On observe sur la figure 2g un pic d'amplitude marqué pour $T=28.6$ min, en bon accord avec l'expression (1), pour une baie circulaire de rayon $R=7$ km, et de profondeur d'eau à l'entrée $h_1=50$ m, qui conduit à $T=23$ min.

La Rade d'Hyères est d'une superficie plus importante, bien prononcée bien que plus ouverte vers le large côté sud, incomplètement fermée par l'île de Porquerolles. Les figures 2h et 2i représentent les amplitudes au niveau des stations de La Capte et de Porquerolles. On observe pour ces deux stations un pic pour $T=54.7$ min, très marqué au niveau de La Capte. Des pics à des périodes plus faibles sont également observés à La Capte, notamment dans la gamme 24.5-32 min. Le pic d'amplitude marqué pour $T=54.7$ min est en bon accord avec l'expression (1), pour une baie circulaire de rayon $R=14$ km, et de profondeur d'eau à l'entrée $h_1=50$ m, qui conduit à $T=49$ min.

3. Origines et exemples d'observations

3.1 Etats de mer associés à des tempêtes

Lors de tempêtes et/ou en présence de mers formées, une partie de l'énergie est portée par des ondes à basse fréquence composant le spectre, ou ondes infragravitaires, dues, par profondeur finie, à des interactions entre triplets de fréquence. De période de l'ordre de quelques minutes, elles peuvent être à l'origine d'oscillations portuaires (ARDHUIN *et al.*, 2010).

Thème 7 – Risques côtiers

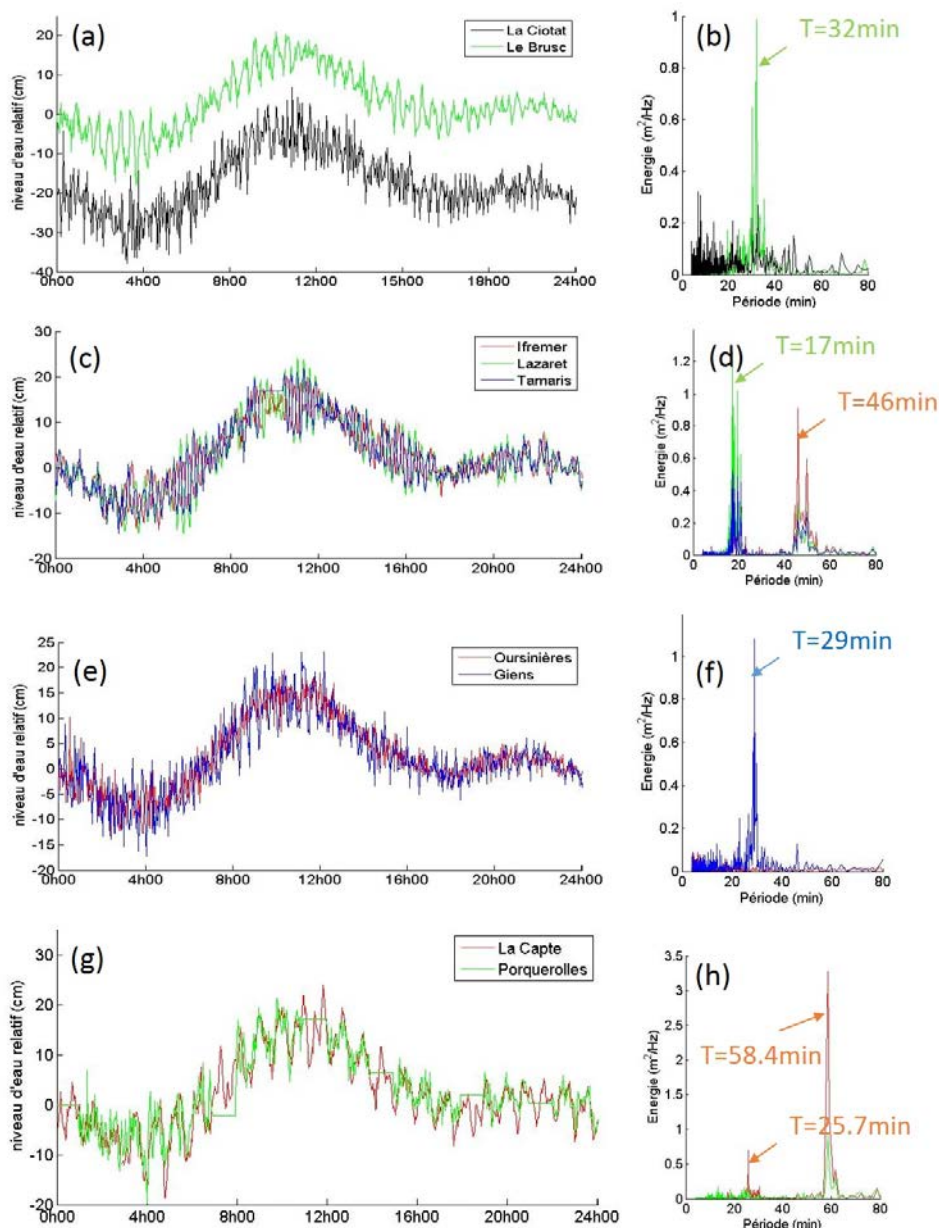


Figure 3. Niveaux d'eau le 5 décembre 2020 et Analyse spectrale des données entre le 4 et le 7 décembre 2020. Les données de La Ciotat sont décalées de 20cm vers le bas.

En outre, le vent peut également, par exemple en créant de façon transitoire une pente de la surface libre, forcer ces oscillations, ensuite amplifiées par résonance. Entre le 4 et le 7 décembre 2020, un épisode météorologique de vent d'est soutenu a été relevé avec des vents d'intensité variant entre 10 et 15 m/s.

Nous avons représenté sur les figures 3a, 3c, 3e et 3g les séries temporelles de niveaux d'eau pour la journée du 5 décembre 2020 des stations de La Ciotat et du Brusac, d'Ifremer, Lazaret et Tamaris, des Oursinières et de Giens, de La Capte et de Porquerolles. On note parfois pour la station de Porquerolles l'absence de données (lignes horizontales) dû à un

problème de transmission GSM. Les FFT des données relevées du 4 au 7 décembre 2020 sont représentées sur les figures 3b, 3d, 3f et 3h. On observe dans la Baie de Sanary une oscillation marquée de période 32 min, avec des variations de niveau atteignant environ 20cm vers 4h00. Seulement du « bruit », lié à l'agitation du plan d'eau, est mesuré à la station de La Ciotat, aucun pic d'énergie n'étant décelé par l'analyse spectrale. Pour la Petite rade de Toulon, la FFT des niveaux mesurés aux différentes stations fait apparaître un pic d'énergie autour de $T=17$ min, le plus élevé pour Tamaris et Lazaret, et un pic autour de $T=46$ min, le plus élevé pour Ifremer. En fait des oscillations à 17 min et à 45 min se succèdent ou coexistent au cours du temps. On voit par exemple l'existence de celle à 45 min vers 01h00 et celle à 17 min vers 6h00. Pour cette dernière, la station d'Ifremer est en opposition de phase par rapport aux deux autres stations. Au niveau des Oursinières, aucune oscillation résonante n'est relevée. Dans le Golfe de Giens, on observe une résonance marquée pour $T=29$ min, avec des variations de niveau assez faibles, environ 10 à 15 cm. Dans la Rade d'Hyères, un pic significatif d'énergie est observé pour $T=58.4$ min, correspondant à la condition de résonance décrite dans la section précédente. Elle est plus marquée pour La capte, mais la FFT calculée pour Porquerolles est sous-évaluée du fait des « trous » dans les données (voir figure 3g). Un pic d'énergie plus faible est également observé pour la station de La Capte, à $T=25.7$ min. La seiche de période $T=58.4$ min est visible toute la journée du 5 décembre et les variations de niveau sont de 10 à 15 cm environ.

Chaque baie résonne ainsi à des fréquences propres, forcées par un état de mer dont le spectre doit inclure de l'énergie dans des gammes de périodes proches des fréquences propres des bassins, ou par des variations de niveau du plan d'eau soumis à la force de cisaillement du vent. On peut en effet noter que du fait de leur orientation, la Baie de Sanary et le Golfe de Giens sont abrités par vent d'est, mais qu'on y observe des seiches, qui peuvent être forcées par vent, « offshore » pour ces baies.

3.3 Tsunami

Le 18 mars 2021 à 08h35, un séisme peu profond et de magnitude 6 s'est déclenché au large de l'est de l'Algérie. De plus faible magnitude que celui de 2003 (ALASSET *et al.*, 2006), il a été détecté par le CENALT (CENTre d'Alerte des Tsunamis). Il a généré des oscillations dans la Petite rade de Toulon (voir figure 4). La station de Lazaret n'était pas opérationnelle en cette période-là. On observe dans un premier temps une oscillation au niveau d'Ifremer de période $T=22.2$ min (voir figure 4.a) qui évolue ensuite vers une période $T=19.3$ min, en même temps que se met en place d'une oscillation de même période en opposition de phase à Tamaris (figure 4.b). Ces oscillations croissent jusqu'à 3h00 puis décroissent jusqu'à un peu avant 5h00 puis croissent à nouveau. On observe un battement causé par la différence de période entre $T=22.2$ min et $T=19.3$ min. L'onde qui force initialement la seiche se retrouvent en opposition de phase un peu plus tard, ce qui génère cet effet de battement.

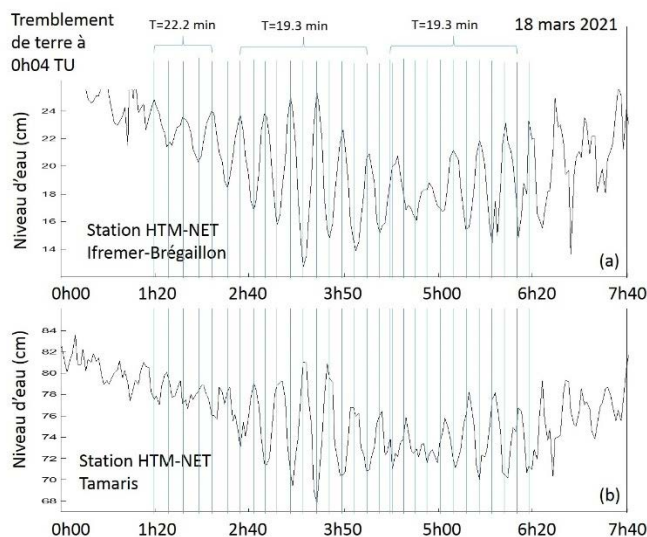


Figure 4. Evolution du niveau d'eau, stations (a) Ifremer et (b) Tamaris.

3.4 Ondes de tempête et météo-tsunami

Les brusques variations de pression atmosphérique peuvent générer des ondes de tempêtes, souvent identifiées comme à l'origine d'oscillation à basse fréquence, comme observé dans des grands ports (DE JONG *et al.*, 2003).

Récemment, suite à l'éruption du volcan Hunga aux îles Tonga dans le Pacifique le 15/01/2022 à 4h14 UTC, deux ondes de choc successives, la première à 20h15 UTC d'amplitude 150 Pa et la seconde de moindre intensité environ 4h plus tard ont été relevées sur les stations HTM-NET (voir figure 5a). La première venait du nord, la seconde du sud. La modélisation des variations de pression atmosphérique à l'échelle du bassin méditerranéen occidental a permis de modéliser la propagation du météo-tsunami et de son impact sur les niveaux d'eau au niveau du littoral provençal (GAILLET *et al.*, 2022). Le tsunami a en effet généré des oscillations au niveau de toutes les baies, comme le montre la figure 5. Ces oscillations sont totalement liées à la configuration des baies, puisque des seiches de périodes très différentes sont observées d'une baie à l'autre. Les variations de niveau atteignent 40 cm dans la Petite rade de Toulon (voir figure 5.b et c, station de Lazaret). En outre, les mouvements du niveau d'eau sont beaucoup moins significatifs hors de ces baies (voir station d'Oursinières).

4. Discussions et perspectives

Nous avons montré par ces quelques exemples et illustrations les potentiels d'études et de compréhension de la dynamique littorale apportés par un réseau d'observation sur le

long terme des niveaux d'eau à l'échelle des baies. En effet si les variations de niveau associés aux forçages globaux varient peu d'un site à l'autre (l'onde de marée est stationnaire dans la zone étudiée), des phénomènes plus locaux associés au vent, à des fronts d'onde atmosphérique ou aux états de mer peuvent conduire à des variations de niveau différentes selon la configuration et l'orientation de la côte.

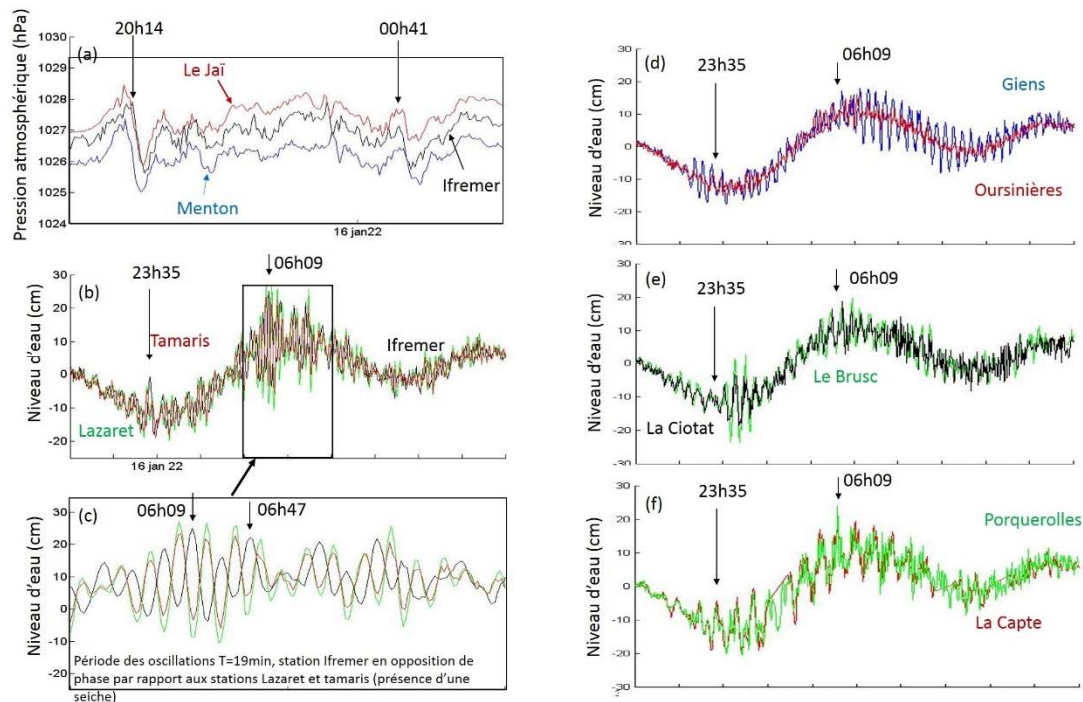


Figure 5. (a) Onde de choc atmosphérique aux stations du Jai (étang de Berre), Ifremer et Menton ; niveaux d'eau : (b) et (c) Petite Rade de Toulon, (d) Grande Rade et Golfe de Giens, (e) Baie de La Ciotat et de Sanary, (f) Rade d'Hyères.

Les phénomènes présentés ici induisent des variations de niveau de période supérieure à la dizaine de minutes. Ils excluent donc l'analyse quantitative des agitations et variations de niveau associées à la houle. Les instruments, disposés dans un tube vertical cylindrique, d'immersion variable selon le niveau d'eau, et d'immersion moyenne pouvant différer de 30 à 40 cm selon les sites, mesurent la pression dans l'eau à une profondeur comprise entre 10cm (lors de décotes) et 140cm (lors des surcotes). Certaines des stations, positionnées à l'entrée de ports ou sur des pontons, fournissent un signal « bruité » en périodes de forte agitation du plan d'eau. Les mesures sont enregistrées toutes les deux minutes mais la durée de la mesure est de l'ordre de la seconde. De ce fait, même si le résultat reste qualitatif, l'analyse de la dispersion des niveaux enregistrés permet une estimation de l'agitation au niveau des stations. En revanche, ce bruit devient gênant lorsque de faibles variations de niveau doivent être traitées, comme celles associées aux seiches dans cette étude. On remarque cependant que les résultats sont

Thème 7 – Risques côtiers

particulièrement propres pour l'épisode du météo-tsunami présenté, du fait des conditions météorologiques clémentes à cette date.

5. Remerciements

Le réseau HTM-NET bénéficie de programmes co-financés par la communauté d'agglomération Toulon Provence Méditerranée (TPM) ou le Conseil Département du Var. Il a été soutenu depuis 2013 par le CNRS/INSU, dans le cadre des programmes nationaux successifs SOERE, SOERIL et ILICO. Le Parc National de Port Cros, la Métropole TPM, la Ville de Hyères, le CD13, La Ciotat Shipyards, le Port des Oursinères, la CCI du Var, sont remerciés pour les autorisations d'implantation des stations, le SHOM pour sa collaboration et Météo-France pour les données météorologiques.

6. Références

- ALASSET P.-J., HEBERT H., MAUCHE S., CALBINI V., MEGHRAOUI M. (2006). *The tsunami induced by the 2003 Zemmouri earthquake (MW = 6.9), Algeria): modelling and results*, Geophys. J. Int.
- ARDHUIN F., DEVAUX E., PINEAU-GUILLOU L. (2010). *Observation et prévision des seiches sur la côte Atlantique française*, XI^{ème} Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, Les Sables d'Olonne, 22-25 juin 2010.
- DE JONG M.P.C., HOLTHUIJSEN L.H., BATTJES J.A. (2003). *Generation of seiches by cold fronts over the southern North Sea*. Journal of Geophysical Research, vol. 108, 3117, 10 p. doi:10.1029/2002JC001422.
- GAILLER A., HEINRICH P., REY V., HEBERT H., DUPONT A., LISTOWSSKI C., FORESTIER E., NTAFFIS S. (2022). *Observation and simulation of the meteotsunami generated in the Mediterranean Sea by the Tonga eruption on 15 January 2022*, EGU General Assembly 2022.
- LASHLEY, C. H., BERTIN, X., ROELVINK, D., *Field measurement and numerical modelling of wave run-up and overwash in the Pertuis Breton embayment, France*, Proc. 7th Int. Conf. on the Appl. of Phys. Mod. in Coast. and Port Eng. (Coastlab18). Santander, Spain, May 22-26, 2018
- MILLOT C., BROCARD R., METAIS O., TINE J. (1981). *Les oscillations propres de la Rade de Toulon*, *Oceanologica Acta*, Vol. 4, 1981.
- PAUGAM C. (2021). *Niveau d'eau à la côte en bassin semi-ouvert : impact du vent, des vagues et de la bathymétrie*, Thèse de l'Université de Toulon, décembre 2021.
- PAUGAM C., SOUS D., REY V., MEULE S. FAURE V., BOUTRON O., LUNA-LAURENT E., MIGNÉ, E. (2021). *Wind tides and surface friction coefficients in semi-enclosed shallow basins*, *Estuarine, Coastal and Shelf Sc.*, 257, 107406
- REY V., DUFRESNE C., FUDA J. L., MALLARINO D., MISSAMOU T., PAUGAM C., ROUGIER G., TAUPIER-LETAGE I. (2020). *On the use of long-term observation of water level and temperature along the shore for a better understanding of the dynamics: Example of Toulon area, France*, *Ocean Dynamics*, <https://doi.org/10.1007/s10236-020-01363-7>;
- RABINOVICH A. B. (2009). *Seiches and harbor oscillations*. In *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, pp. 193–236. World Scientific.