

ANALYSE DE MESURES COURANTOMETRIQUES DANS LE GOLFE DE HAMMAMET

Mouldi BRAHIM*, A. ATOUI et Ch. SAMMARI

Institut National des Sciences et technologies de la Mer

*Mouldi.brahim@instm.rnrt.tn

ملخص

قيس التيارات المائية في خليج الحمامات. يتعرض ساحل خليج الحمامات للخطر بسبب التدهور الطبيعي والبشري. هذا يؤثر على نوعية الحياة والمصالح الاستراتيجية للبلاد. التيارات البحرية هي المسؤولة بشكل رئيسي عن هذا التدهور. لفهم تدفق المياه في هذه المنطقة، قمنا بنشر آلتين لقيس التيارات المائية.

يشير التحليل التوافقي لمستويات المياه إلى أن المد والجزر التوافقي $M2$ هو المسيطر. المد شبه نهاري في خليج الحمامات يوضح التحليل بطريقة الدالة المتعامدة التجريبية لسلسلة السرعات الحالية على مستوى خليج الحمامات. أن التيار السطحي يتجه نحو الشمال الشرقي الموازي للساحل بأقصى سرعة على طول المحور الرئيسي حوالي 5.9 صم/ث. يتحول التيار بالقرب من القاع إلى الشمال الغربي ويتبع مسار متساوي العمق 20 مترًا وبسرعة قصوى تبلغ حوالي 2.2 صم/ث.

يوضح تطور متجه السرعة واتجاه التيار العام (الرياح والأمواج والضغط الجوي و المد و الجز) خلال فترة التسجيل أن الاتجاه مواز للساحل في المياه السطحية بسرعة يمكن أن تتجاوز 20 صم/ث. ومع ذلك، فإن التيارات بالقرب من القاع تكون أضعف ولكن يمكن أن تتجاوز 10 صم/ث. هذه التيارات تتبع مسار متساوي العمق 20 مترًا. قد ترتبط التيارات الضعيفة بالقرب من القاع بتيارات الدوران العامة ذات الأصل الأطلسي.

يبدو أن التيارات السطحية ترتبط ارتباطًا وثيقًا بالتأثير المشترك للرياح والأمواج والضغط الجوي. يلعب المد دورًا ضعيفًا إلى حد ما في تداول المياه في خليج الحمامات.

أتاح لنا تحليل السلاسل الزمنية التي تم الحصول عليها في خليج الحمامات تحديد الخصائص الديناميكية السائدة في منطقة الدراسة. قد تم إثبات مدى انخفاض المد والجزر (12 صم) وخاصة وجود التيارات القوية (صم/ث) والتي يتناوب اتجاهها بين الشمال والجنوب. شكل التيارات المقاسة بعيدًا عن الشاطئ نموذجي للديناميكية التي تتميز ببنية دوامة.

كلمات مفاتيح: خليج الحمامات، قياسات موقعية، مستوى المياه، تيارات، المعادلات التجريبية المتعامدة.

RESUME

Le littoral du golfe de Hammamet est menacé par la dégradation naturelle et anthropique. Celle-ci touche la qualité de la vie et les intérêts stratégiques du pays. Les courants marins sont en majeure partie responsable de cette dégradation. Pour comprendre la circulation des eaux dans cette zone, nous avons déployé deux courantomètres.

L'évolution du vecteur vitesse et de la direction du courant dus aux phénomènes de haute fréquence (marée) et de basse fréquence (vent, houle et pression atmosphérique) durant la période de l'enregistrement montre que la direction est parallèle à la côte dans les eaux de surface avec une vitesse qui peut dépasser les 20 cm.s^{-1} . Cependant les courants près du fond sont plus faibles mais peuvent dépasser les 10 cm.s^{-1} . Ces courants suivent l'isobathe -20m . Les courants mesures peuvent aussi être associés, en partie près du fond aux courants de la circulation générale des eaux d'origine Atlantique.

L'analyse harmonique des niveaux d'eau indique que l'harmonique de la marée $M2$ est dominante. La marée est semi-diurne dans le Golfe de Hammamet

L'analyse par la méthode de la fonction empirique orthogonale de la série des vitesses des courants de la marée au niveau de Golfe Hammamet montre que le courant de surface s'oriente vers le nord-est parallèle à la côte avec une vitesse maximale suivant l'axe principal de l'ordre de 5.9 cm.s^{-1} . Le courant près du fond s'oriente vers le nord-ouest et suit l'isobathe -20 m avec une vitesse maximale de l'ordre de 2.2 cm.s^{-1} .

Les courants de surface sont étroitement liés à l'effet conjugué du vent et de la houle et de la pression atmosphérique. La marée joue un rôle assez faible pour la circulation des eaux dans le Golfe de Hammamet.

L'analyse des séries temporelles obtenues dans le golfe de Hammamet nous ont permis d'esquisser les caractéristiques dynamiques qui prévalent dans la région d'étude. Il a été démontré le faible marnage (12 cm) et surtout la présence de courants fort (15 cm.s^{-1}) et dont la direction s'alterne entre le Nord et le Sud. L'allure des courants mesurés au large est typique d'une dynamique marquée par une structure tourbillonnaire.

Mots clés : golfe de Hammamet, mesures *in situ*, niveaux de l'eau, courant, analyse en EOF.

ABSTRACT

Analysis of current metric measurements in the gulf of Hammamet : The coastline of the Gulf of Hammamet is threatened by natural and anthropogenic degradation. This affects the quality of life and the strategic interests of the country. To understand the flow of water in this area, we deployed two current meters.

Harmonic analysis of water levels indicates that the tidal harmonic $M2$ is dominant. The tide is semi-diurnal in the Gulf of Hammamet. The Analysis by the method of the empirical orthogonal function of the series of tidal currents speeds at the level of Gulf Hammamet shows that the surface current is oriented towards the northeast parallel to the coast with a maximum speed along the main axis of the order of 5.9 cm.s^{-1} . The current near the

bottom turns northwest and follows the -20 m isobath with a maximum speed of around 2.2 cm.s^{-1} . The evolution of the speed vector and the direction of the current which is due to the phenomena of high frequency (tide) and low frequency (wind, swell and atmospheric pressure) during the recording period show that the direction is parallel to the coast in surface waters with a speed which can exceed 20 cm.s^{-1} . However, the currents near the bottom are weaker but can exceed 10 cm.s^{-1} . These currents follow the -20 isobath. Weak currents near the bottom may be associated with general circulation currents of Atlantic origin. It seems that surface currents are closely related to the combined effect of wind and swell and atmospheric pressure. The tide plays a rather weak role for the circulation of water in the Gulf of Hammamet. The analysis of the time series obtained in the Gulf of Hammamet allowed us to sketch the dynamic characteristics that prevail in the study region. It has been demonstrated the low tidal range (12 cm) and especially the presence of strong currents (15 cm.s^{-1}) and whose direction alternates between North and South. The shape of the currents measured offshore is typical of a dynamic marked by a vortex structure.

Key words: Gulf of Hammamet, in situ measurements, water levels, current, EOF analysis.

PRESENTATION DE LA ZONE

Le golfe de Hammamet est situé au nord-est de la Tunisie. Il est entouré par le cap Bon au nord, la plaine d'Ennefidha à l'ouest, les plaines du Sahel au sud et la mer Méditerranée à l'est.

Au large du golfe de Hammamet, la houle est caractérisée par des longueurs d'ondes relativement faibles. Les statistiques de la fréquence de la houle, au large des côtes du golfe de Hammamet, se traduisent par des roses de houle qui montrent une variation remarquable du Nord au Sud. En effet, dans la partie Nord du golfe les roses montrent des houles qui ont des directions Nord-Est et Est. Leur hauteur varie de 1 à 2.5 m pour la plupart des cas et peut atteindre 5m pour des périodes supérieures à 10s (Zaara, 1996). Les houles enregistrées dans la partie Sud du golfe de Hammamet montrent une variation saisonnière assez importante. La direction de la houle prédominante change d'une saison à une autre. Elle est de Sud-est et Sud-Sud-est. Les courants de retour sont des courants induits par les houles à l'approche de la côte. En effet, la compensation de l'apport d'eau à la côte par les houles déferlantes se fait par un retour d'eau vers le large, créant des courants d'arrachement (Paskoff, 1957, 1981, 1994), qualifiés aussi de courants sagittaux qui peuvent être perpendiculaires ou obliques par rapport au rivage. Sous l'action des houles obliques par rapport au rivage, un courant de houle prend naissance entre la zone de déferlement et le trait de côte. Son angle d'incidence est généralement inférieur à 10° par rapport au Nord.

Les courants généraux des eaux de surface en Méditerranée circulent de l'Ouest vers l'Est au large des côtes Nord de la Tunisie et du Nord vers le Sud au large de la côte Est. La côte Est est caractérisée par des courants faibles avec des vitesses de l'ordre de 10 à 30 cm.s^{-1} (SGTE-LCHF, 1978).

Sur les côtes tunisiennes, la marée dominante est de type semi-diurne liée à la lune et au soleil (de type M2 et de type S2). La répartition des amplitudes de ces deux types de marée (M2 et S2) établie à l'aide de modèles numériques, respectivement par Tsimplis et

al. (1995) et par Abdennadher et Boukthir (2006). Ces modèles ont été calés par des observations de la variation du niveau de la surface de la mer en plusieurs points en Méditerranée. La marée dominante M2 est caractérisée par un point amphidromique (minimum d'élévation et vitesse) localisé dans le détroit de Sicile. La marée a une amplitude d'environ 12 cm sur les côtes nord. L'onde de marée traverse le détroit près des côtes tunisiennes tout en s'atténuant (5 cm dans le golfe de Hammamet). Elle se dirige ensuite vers le sud et pénètre dans le golfe de Gabès en s'amplifiant et engendrant une forte résonance (Sammari et al. 2006). La marée de type M2 dans le golfe de Hammamet atteint 5 cm et celle de type S2 est du même ordre. Les courants de marée sont de l'ordre de 10 cm.s^{-1} . Ils sont associés aux courants de houle générés par les vents locaux et peuvent jouer un rôle important dans la dynamique côtière (SGTE-LCHF, 1978).

Au large du golfe de Hammamet, la houle est caractérisée par des longueurs d'ondes relativement faibles. Les statistiques de la fréquence de la houle au large des côtes du golfe de Hammamet se traduisent par des roses de houle qui montrent une variation remarquable du Nord au Sud. En effet, dans la partie Nord du golfe La rose de la houle montre que les houles dans la zone sont de directions Nord-Est et Est. Leur hauteur varie de 1 à 2.5 m pour la plupart des cas et peut atteindre 5m pour des périodes supérieures à 10s (Zaara, 1996). Les houles enregistrées dans la partie Sud du golfe de Hammamet montrent une variation saisonnière assez importante.

Ce travail avait pour but d'étudier l'hydrodynamique dans le Littoral D'Ennefidha à travers l'analyse des séries chronologiques de la vitesse et de la direction des courants.

MATERIEL ET METHODES

Pour mieux comprendre l'hydrodynamique dans le golfe de Hammamet, nous avons installé deux courantomètres au fond du littoral d'Ennefidha. Un

courantomètre de Type ADCP-500Khz (*Acoustic Doppler Current Profiler*) de la marque SonTek (www.sontek.com) a été déployé à 24 m de profondeur (figure 1). Il a été installé durant la période allant du 22-06-2015 au 07-10-2015 (34°14.037'N et 10°07.193' E). Il est équipé d'un module de houle directionnelle, 2048 mesures ont été effectuées avec une cadence de 2Hz (soit environ 17 minutes) et cela toutes les 30 minutes.

Un courantomètre de type Argonaute a été aussi installé à 4m de profondeur (34°14.791'N et 10°07.855' E) durant la période allant du 22-06-2015 au 07-10-2015. Les mesures ont été effectuées avec une cadence de 1,5Mhz et cela toute les 60 minutes. Le courantomètre étant posé sur le fond à une profondeur de 4m, mesure donc le courant moyen à - 2,5 m de la surface.

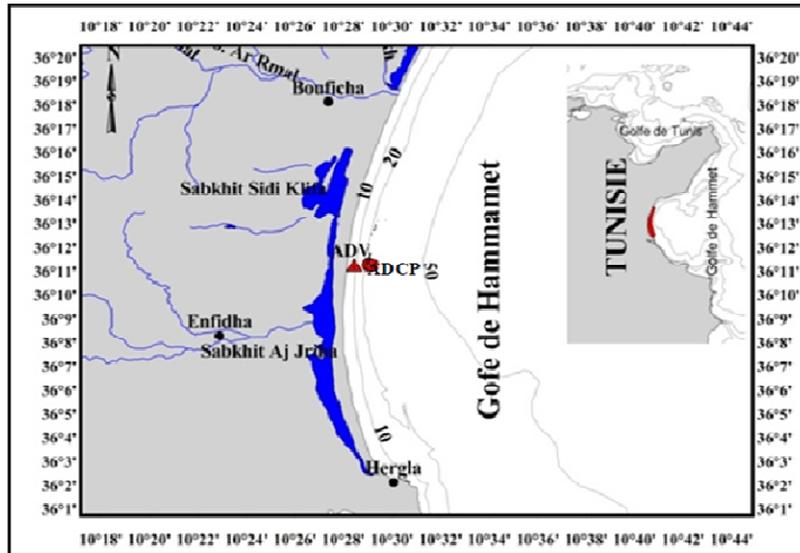


Figure 1 : localisation des instruments de mesures des courants (ADCP et ADV).

RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats enregistrés par L'ADCP

Température

L'évolution de la température (ADCP) montre qu'à 24 mètres de profondeur, les températures sont élevées en période estivale et peuvent atteindre les 29°C (figure 2). La température montre aussi des fluctuations à des échelles comprises entre 3 et 5

jours qui sont certainement attribuées à des coups de vent. Une augmentation brusque de la température le 10 juillet est constatée. En effet, la température est passée, en moins de deux heures, de 21°C à 26°C. Ce fait nous a amené à vérifier l'état du capteur. Celui-ci a été trouvé en état de fonctionnement normal. Nous n'avons donc pas été en mesure de donner une explication à ce saut de température.

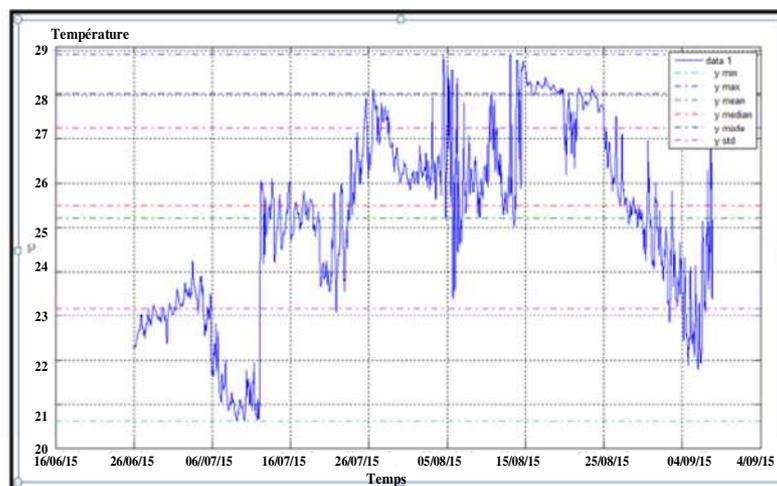


Figure 2 : évolution de la température enregistrée par l'ADCP

Niveau d'eau

Nous avons appliqué à la série brute du niveau d'eau mesuré par l'ADCP (figure 3a) une analyse harmonique pour extraire la série de la marée. Cette analyse a été faite après avoir supprimé les 100 premières et les 45 dernières valeurs de la série brute pour ne garder que les valeurs qui correspondent aux enregistrements in situ de la marée par l'ADCP. Pour filtrer les oscillations de basses fréquences, nous avons également appliqué à la série brute un filtre ayant une fréquence de coupure (f_c) de $1/34h$. Les résultats sont récapitulés dans le tableau I et la figure 3b.

Les caractéristiques de la marée et notamment les valeurs de l'amplitude montrent que l'onde M2 est

dominante avec une amplitude de 5.61cm. En additionnant les amplitudes des composantes significatives on obtient une amplitude moyenne de 12.02cm. Le signal résiduel (figure 3c) présente des fluctuations de haute fréquence notamment à partir du 03-09-septembre 2015. La zone d'étude est certainement le siège de phénomènes particuliers susceptibles de se manifester et dont l'échelle de variabilité est inférieure à celle de la marée

Les fluctuations ont eu lieu durant la même période marquée par une augmentation brusque de la température. Tout donc porte à croire qu'un phénomène météorologique s'est produit. Il a généré une élévation de la température pendant un court intervalle de temps.

Tableau I : Caractéristiques de la marée enregistrée par l'ADCP

Tide	T(h)	Amp (cm)	Pha (°)
Q1	26.86	0.33±0.2	37.44±30.95
O1	25.81	1.07±0.2	102.31±8.83
K1	23.93	0.35±0.2	281.37±23.48
UPS1	21.57	0.29±0.3	169.32±52.05
N2	12.65	0.6±0.2	21.12±20.5
M2	12.42	5.61±0.2	9.84±1.75
L2	12.19	0.35±0.2	352.64±37.63
S2	12.00	4.5±0.2	23.54±2.76
K2	11.96	1.22±0.2	45.94±12.13
M4	6.21	0.41±0.2	254.65±25.54
MS4	6.10	0.29±0.2	314.54±33.22

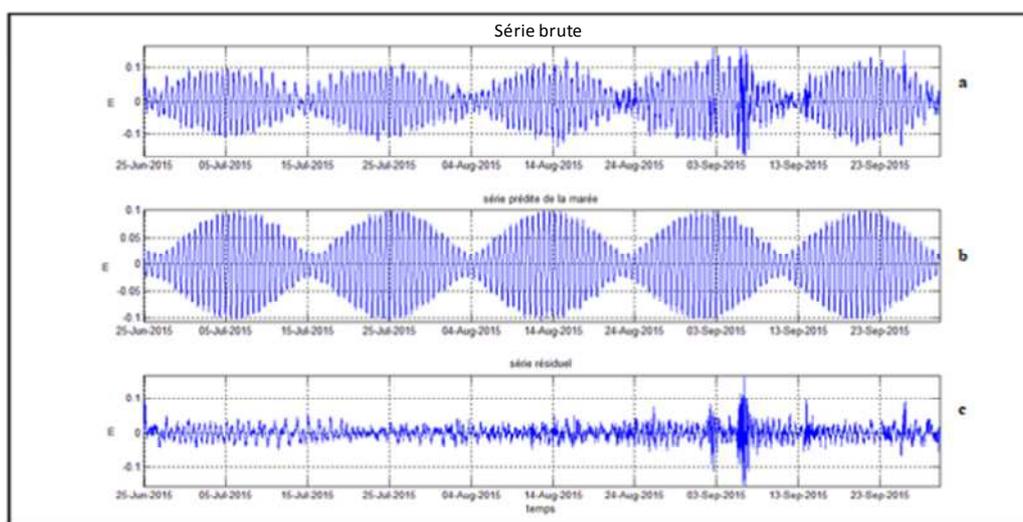


Figure 3. Analyse des courants enregistrés par l'ADCP : série brute (a), série prédite de la marée (b) et la série de basse fréquence (c).

La houle dans le golfe de Hammamet

Le tableau II illustre la répartition des hauteurs (Hs) de la houle en fonction des périodes enregistrée par

l'ADCP. Les périodes 5-6 secondes sont dominantes même si les hauteurs sont relativement faibles (< 60 centimètres).

Tableau II: La répartition des hauteurs (Hs) de la houle en fonction des périodes.

Hs (cm)/T(s)	<4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	>13	obs.
>100												
90-100												
80-90												
70-80												
60-70												
40-60			0.65%	0.22%								0.87%
30-40			0.76%	0.22%								0.97%
20-30			1.73%									1.73%
10-20			5.39%	2.80%	0.76%							8.95%
0-10			76.80%	5.72%	3.45%	0.97%	0.54%					87.48%
Obs.			85.33%	8.95%	4.21%	0.97%	0.54%					100.00%

La rose de houle (figure 4) montre que la direction principale du déplacement de la houle est de Nord-est avec de faibles amplitudes dépassant rarement les 40 centimètres. Ce résultat est conforme aux travaux antérieurs (Beranger et al. 2004) ; Abdennadher et Boukthir, 2006, Tsimplis, 1995 Molines, 1991). La direction privilégiée de la houle enregistrée par l'ADCP est conforme aux enregistrements des vents

pendant la période de déploiement des courantomètres. En effet, les vents dominants (figure 5) sont de secteur Est/Nord-est. Les houles au large de secteur Nord/nord-ouest se réfractent au niveau de la pointe du cap-Bon et changent de direction et deviennent des houles de secteur Nord-est dans le golfe de Hammamet.

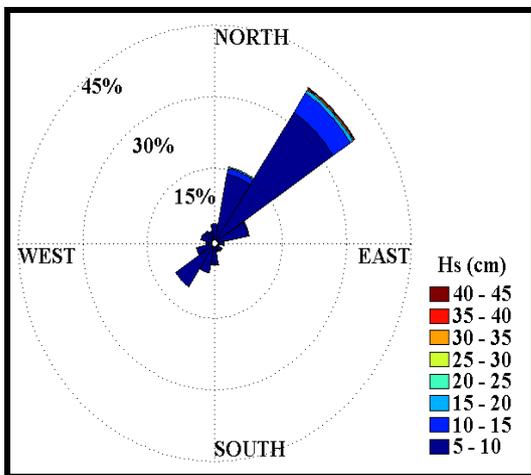


Figure 4 : Rose de la houle dans le golfe de Hammamet (ADCP)

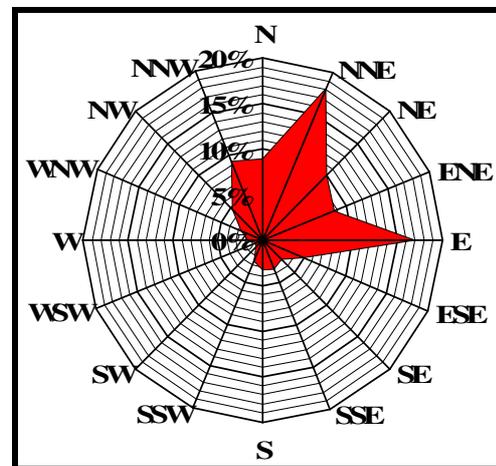


Figure 5 : Rose des vents dominants dans le golfe de Hammamet

Les courants

Surface (-4m)

Les courants mesurés à 4m de profondeur sont présentés sur la figure 6. Nous pouvons constater une alternance dans la direction de courants de haute et de basse fréquence entre le Nord et le Sud dans la tranche d'eau superficielle (-4m). Ceci est le signe d'un signal de marée. Le module de la vitesse est variable ; il s'intensifie jusqu'à atteindre les 30 cm.s⁻¹

à certaines dates de l'enregistrement (figure 6a, surface). La série montre que les courants bruts ont une direction variant du Nord-Nord-Est au Sud-Sud-ouest plus au moins parallèle à la côte du littoral d'Ennfidha. A une certaine date de l'enregistrement (du 24 août à 5 septembre 2015) les courants prennent une direction unique (Nord) avec des vitesses plus intenses, ces intensifications sont certes générées par les vents et la houle.

Il y a une différence faible entre la série brute et la série filtrée basse fréquence (figure 6b surface). Les effets du vent et de la houle sont plus importants que l'effet de la marée sur la circulation des eaux dans le golfe du Hammamet. La circulation à la surface des courants est due essentiellement aux vents et à la houle.

Mi-profondeur (-10m)

L'évolution de la vitesse et de la direction de courants bruts à mi-profondeur (-10 m) montre une alternance dans la direction entre le Nord-Nord-Ouest et le Sud-Sud-est et des vitesses variables qui dépassent les 20 cm.s^{-1} à certaines dates (figure 6a, mi-profondeur). La fin de la série montre des courants de direction Nord avec des vitesses qui peuvent dépasser les 20 cm.s^{-1} .

L'évolution de vitesse et de la direction de courants de basse fréquence (figure 6b, mi-profondeur) à 10 m de profondeur, montre une alternance durant la période allant du 25 juin à 2 août avec des vitesses qui peuvent atteindre 20 cm.s^{-1} . La vitesse devient faible et ne dépasse pas les 10 cm.s^{-1} pendant la période allant du 3 au 16 août. A la fin de la série, entre le 23 août et le 5 septembre 2015, le courant prend aussi une direction privilégiée (Nord) avec des vitesses qui varient entre 15 cm.s^{-1} et 20 cm.s^{-1} . Il n'y a pas une différence remarquable de la vitesse des courants entre la série brute et la série filtrée. Les vents et la houle peuvent avoir donc avoir un impact important sur les courants dans le golfe de Hammamet à 10 m de profondeur.

Fond (-19m)

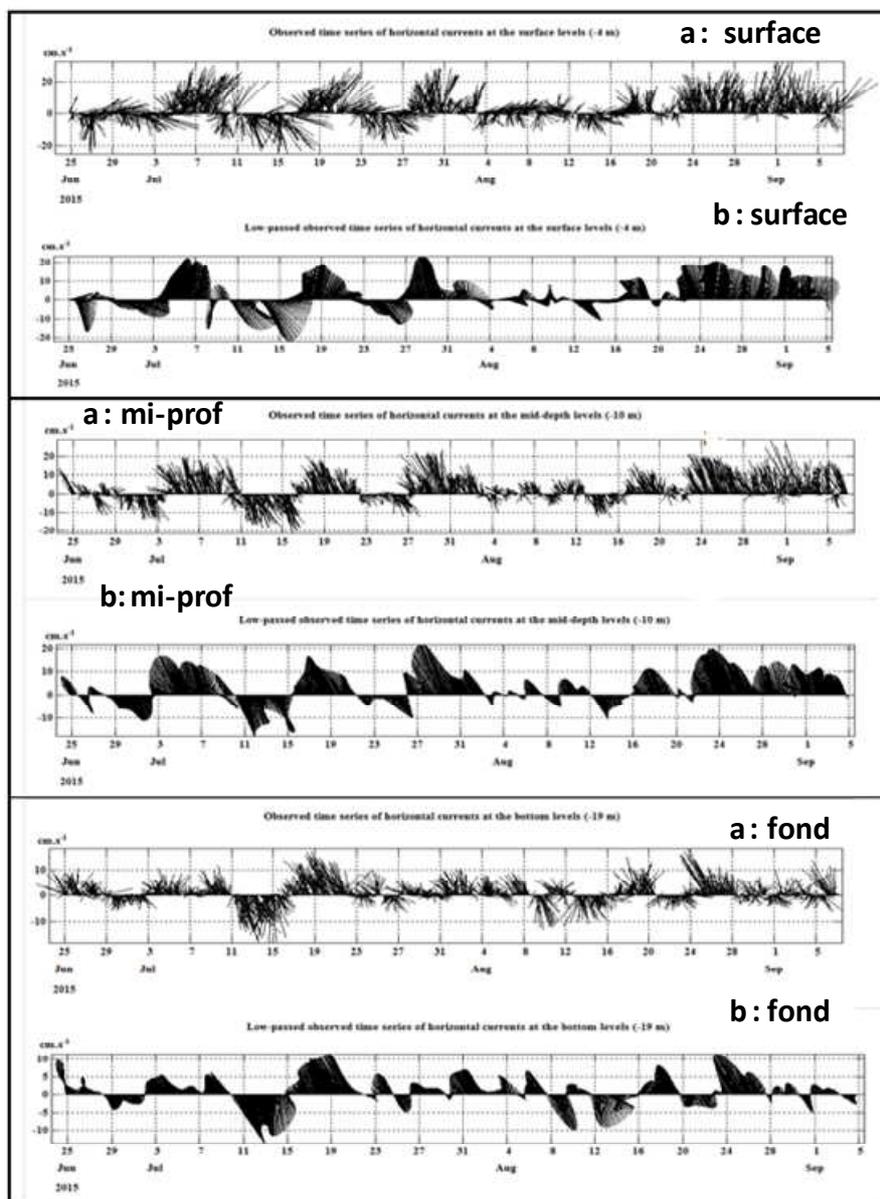


Figure 6 : Evolution dans le temps du vecteur vitesse des séries brutes à 4, 10 et 19 m de profondeur (a) et celles desquelles ont été filtrées les hautes fréquences à 4, 10 et 19 m de profondeur (b)

L'évolution de la vitesse et de la direction de courants bruts au fond (-19m) montre une alternance dans la direction entre le Nord-Nord-Ouest et le Sud-Sud-est et des vitesses faibles qui ne dépassent pas en général les 10 cm.s^{-1} . La vitesse augmente et peut atteindre les 20 cm.s^{-1} entre le 11 et le 23 juillet (figure 6a, fond). La polarisation de la vitesse est probablement induite par des régimes particuliers, due à l'effet de la bathymétrie et du vent.

L'évolution de la vitesse et de la direction de courants de basse fréquence (figure 6b, fond) près du fond, à 19 m de profondeur, montre aussi une variation de la direction des courants entre le Nord-Nord-Ouest et le Sud-Sud-est durant toute la période de l'enregistrement. La vitesse moyenne près du fond est de l'ordre de 5 cm.s^{-1} . La série des courants présente

une intensification de la vitesse entre le 20 juillet et entre le 23 et le 25 août 2015.

Pour les 3 couches montrées les courants en provenance du secteur Nord sont plus intenses que ceux du secteur sud. Ceci peut être attribué à l'effet du vent, de la houle mais aussi à la présence de la veine résultante de la circulation générale des eaux d'origine Atlantique. La bathymétrie est importante pour les couches à mi-profondeur et de fond.

La rose des courants

La figure 7a présente les roses des courants bruts à 4, 10 et 19 mètres de profondeur. Elle confirme ce que nous avons mentionné plus haut à savoir la prédominance des directions Nord-Nord-Est/Sud-Sud-Ouest en surface (-4m) et Nord-Nord-Ouest/Sud-Sud-est à mi-profondeur (-10m) et au fond (-19m).

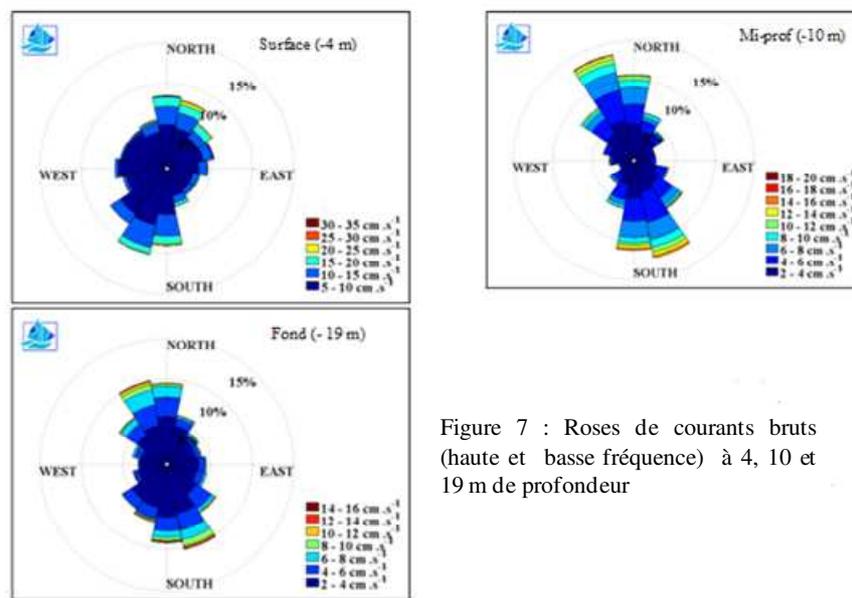


Figure 7 : Roses de courants bruts (haute et basse fréquence) à 4, 10 et 19 m de profondeur

La figure 8b présente les séries de hautes fréquences du vecteur vitesse à 4, 10 et 19 mètres de profondeur qui sont analysées en appliquant l'analyse en fonctions empiriques orthogonales (EOF). Cette analyse nous permet d'étudier la répartition des vitesses de la marée selon les deux axes principaux. On note que la direction des courants de marée à la surface (-4m) a un angle d'incidence de 47° par rapport à l'est (figure 8b). Le courant principal est de direction nord-est/ sud-ouest, parallèlement à la ligne de côte avec un courant de retour côte- large. La vitesse maximale suivant l'axe principal est de l'ordre de $5,9 \text{ cm.s}^{-1}$ et celle suivant l'axe secondaire est de l'ordre de $3,4 \text{ cm.s}^{-1}$ (figure 8b).

On note que la direction de l'écoulement du à la marée à mi-profondeur (-10m) a un angle d'incidence

supérieure à 90° par rapport à l'Est. Le courant principal est de direction Nord-nord-ouest/ Sud-sud-est qui suit l'isobathe de -20 m (figure 8b). La vitesse maximale suivant l'axe principal est de l'ordre de 3 cm.s^{-1} et celle de l'axe secondaire est de l'ordre de $1,8 \text{ cm.s}^{-1}$ (figure 8b).

La direction du courant de marée près du fond (-19 m) a aussi un angle d'incidence supérieur à 90° par rapport à l'Est. Le courant principal est de direction Nord-ouest/Sud-est avec un courant de retour de direction Nord-est/Sud-ouest (figure 8b). La vitesse maximale suivant l'axe principal est de l'ordre de $2,2 \text{ cm.s}^{-1}$ et celle suivant l'axe secondaire est de l'ordre de $1,9 \text{ cm.s}^{-1}$ (figure 8b).

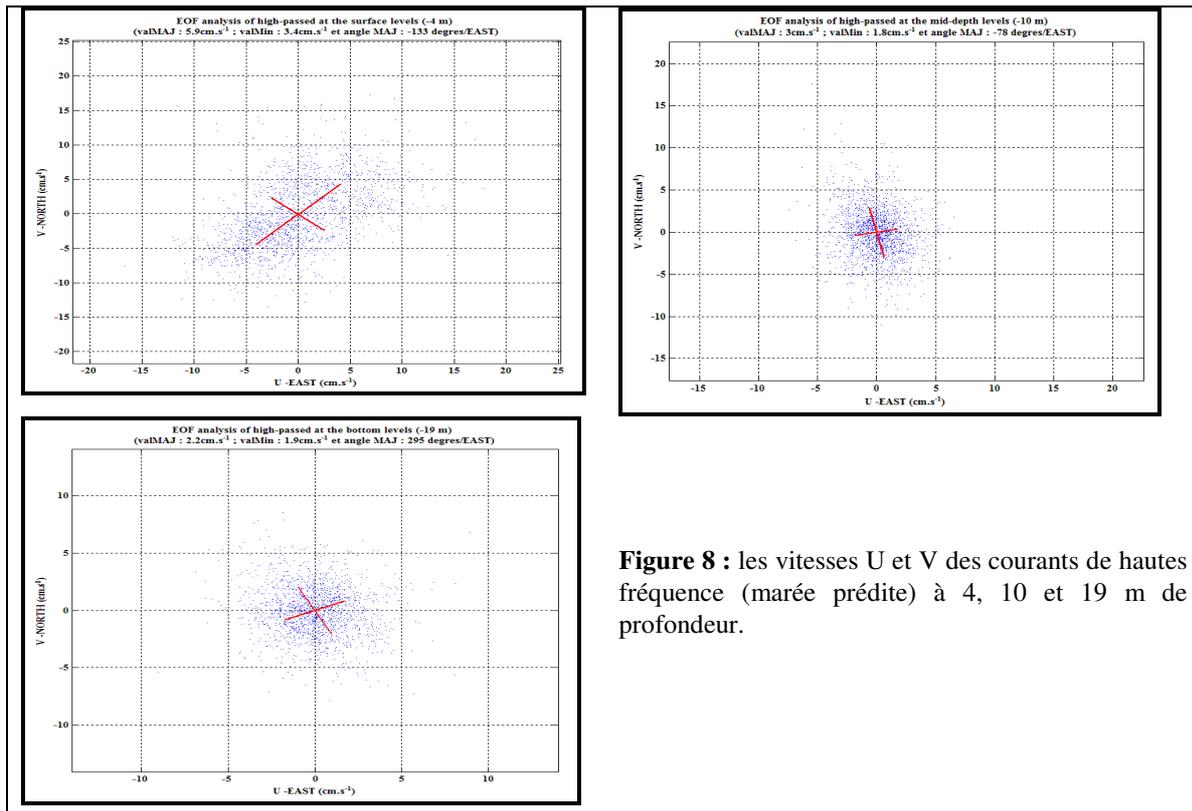


Figure 8 : les vitesses U et V des courants de hautes fréquence (marée prédite) à 4, 10 et 19 m de profondeur.

Résultats enregistrés par L'Argonaute
Température

La figure 9 montre l'évolution de la température enregistrée par le courantomètre de type Argonaute déployé à 4m de profondeur. Contrairement à ce que nous avons observé au large, la température près de la

côte croit régulièrement entre le 22 juin et le 12 août date à laquelle elle avoisine les 30°C puis chute d'une manière régulière pour atteindre les 24 °C au début du mois d'octobre. Il est à noter que les températures demeurent élevées en période automnale (>27°C au début du mois de septembre).

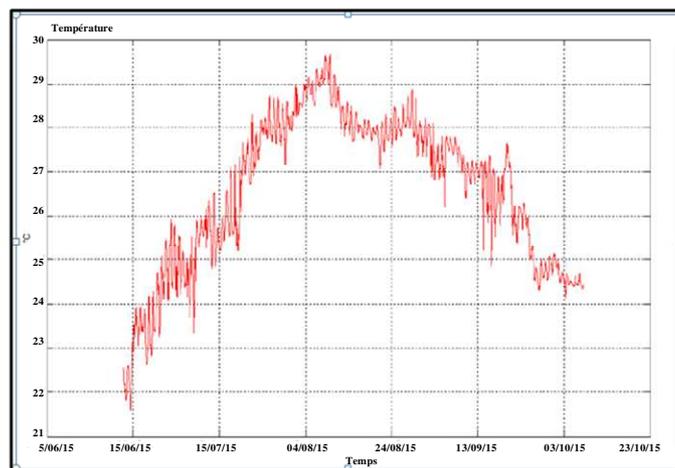


Figure 9 : évolution de la température enregistrée par l'Argonaute

Niveau d'eau

La figure 10 présente les séries brutes du niveau d'eau de basse et de haute fréquence. Nous y notons le faible marnage et surtout une anomalie qui s'est produite au début de l'enregistrement à 25 juin 2015 qui laisse penser que le courantomètre s'est incliné.

D'ailleurs cette anomalie s'est répercutée sur les séries temporelles de courant.

De même que pour l'ADCP, nous avons appliqué à cette série une analyse harmonique. Les oscillations de basses fréquences ont été filtrées avec un filtre ayant une fréquence de coupure (Fc) de 1/34h. Les

résultats sont récapitulés dans le tableau III et la figure 10.

Tableau III : Les composantes de la marée enregistrée par l'Argonaute

marée	T(h)	Amp(cm)	Pha(°)
M2	12.4206013	5.65 ± 0.2	34.23 ± 2.17
S2	12.0000048	4.55 ± 0.2	23.55 ± 2.58
K2	11.9672337	1.24 ± 0.3	45.95 ± 10.79
O1	25.8193113	1.07 ± 0.2	127.68 ± 9.01
N2	12.658356	0.61 ± 0.2	58.57 ± 16.86
K1	23.9344961	0.35 ± 0.2	280.33 ± 27.32

La composante M2 est ici aussi prédominante avec une amplitude de 5,65cm. La deuxième composante est celle du S2 avec une amplitude de 4,55cm.

L'amplitude de la somme des composantes significatives (M2, S2, K2 et O1) est égale à environ 12,5 cm (tableau III).

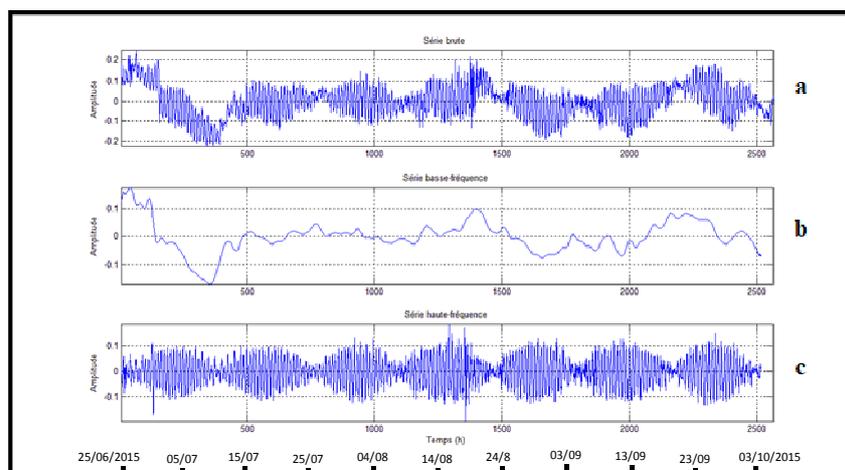


Figure 10 : Analyse des courants enregistrés par l'Argonaute : série brut (a), série haute fréquence (b) et la série de haute fréquence

La série de basse fréquence (figure 10b) montre des fortes amplitudes au début de l'enregistrement et vers le 18 août 2015. Ceci est dû à l'effet conjugué du vent, de la houle et de la pression atmosphérique. Une baisse du niveau de la mer est observée vers le 10 juillet 2015 qui peut être expliquée aussi par un phénomène météorologique, probablement en relation avec une augmentation de la pression atmosphérique

CONCLUSION GENERALE

L'analyse des séries temporelles obtenues dans le golfe de Hammamet nous ont permis d'esquisser certaines caractéristiques dynamiques qui prévalent dans la région d'étude. En particulier, il a été démontré le faible marnage (12 cm) et surtout la présence des courants forts (>15 cm.s⁻¹) et dont la direction s'alterne principalement entre le Nord et le Sud avec une prédominance de ceux du nord. L'allure des courants mesurés au large (ADCP) du site est typique d'une dynamique marquée par la présence d'une structure tourbillonnaire.

L'analyse harmonique des niveaux d'eau indique que l'harmonique de la marée M2 est dominante. La marée est semi-diurne dans le Golfe de Hammamet.

L'analyse par la méthode de la fonction empirique orthogonale de la série des vitesses des courants de la marée montre que le courant de surface s'oriente vers le nord-est parallèle à la côte avec une vitesse maximale suivant l'axe principal de l'ordre de 5.9 cm.s⁻¹. Le courant près du fond s'oriente vers le nord-ouest et suit l'isobathe -20 m avec une vitesse maximale de l'ordre de 2.2 cm.s⁻¹.

L'évolution du vecteur-vitesse et de la direction des courants qui sont dus aux phénomènes de haute fréquence (marée) et de la basse fréquence (vent, houle et pression atmosphérique) durant la période de l'enregistrement montre que la direction est parallèle à la côte dans les eaux de surface avec une vitesse qui peut dépasser les 20 cm.s⁻¹. Cependant les courants près du fond sont plus faibles mais peuvent toutefois dépasser les 10 cm.s⁻¹. L'orientation de ces courants suit celle de la bathymétrie (isobathe -20 m). Les courants près du fond peuvent s'associer aux courants de la circulation générale d'origine atlantique. Les courants de surface sont étroitement

liés à l'effet conjugué du vent et de la houle et de la pression atmosphérique. La marée joue un rôle assez faible dans la circulation des eaux dans le Golfe de Hammamet.

BIBLIOGRAPHIE

- Abdennadher, J., Boukthir, M., 2006. Numerical simulation of the barotropic tides in the Tunisian shelf and the strait of Sicily. *J. Mar. Syst.* 63, 162–182.
- Ben Ismail, C., Sammari, G.P., Gasparini, K., Béranger, M., Brahim, L., Aleya, L., 2012. Water masses exchanged through the Channel of Sicily: evidence for the presence of new water masses on the Tunisian side of the channel. *Deep-Sea Res. I* 63, 65–81.
- Ben Ismaïl S. 2014. Étude de la dynamique dans la Méditerranée Centrale, thèse de doctorat préparé au laboratoire Milieu Marin, Université de Tunis El Manar, Ecole Doctorale Sciences de Biologie, LR02INSTM04-Institut National des Sciences et Technologies de Mer Salammbô, 171p.
- Béranger, K., Mortier, L., Gasparini, G.P., Gervasio, L., Astraldi, M., Crépon, M., 2004. The dynamics of the Sicily Strait: a comprehensive study from observations and models. *Deep-Sea Res. I*, 411–440.
- Direction des ressources en eau et en sol. 1973. Carte de pédologie de Tunis [En ligne] 1:500000, 1 carte couleur, 418x4280 pixels, 3, 86 Mo. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/EuDASM/africa/maps/afr_tncpd1.htm> Consulté le 30 Mars 2014.
- Direction générale des ressources en eau et direction des eaux de surface 2007–2008. *Annuaire hydrologique de la Tunisie*, Ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques et de la pêche, 241p.
- El Batti D. 1974. Hydrogéologie de la plaine d'Enfidaville. Thèse de 3 cycle université de science et Méditerranéenne. Grenoble. 121p
- Folk R. L., 1966. Review of grain-size parameters, *Sedimentology*, Oxford. 6, pp13-27
- Molines J.M. 1991. Modelling the barotropic tides in the Strait of Sicily and Tunisian shelf. *Oceanologica Acta*, Vol. 14(3), pp 241-252.
- Pasok R. 1981. L'érosion des plages en Tunis *Rev Tunis Géogr.*, n°8, pp 82-96.
- Paskoff R. 1994. Les littoraux impacts des aménagements sur leur évolution 2^{ème} édition, 256p.
- SGTE-LCHF, 1978. _Etude des ports de pêche côtière. *Etudes Hydrauliques*, 56 pp.
- Sammari, C., Millot, C., Taupier Letage, I., Stefani, A., Brahim, M., 1999. Hydrological characteristics in the Tunisia-Sardinia-Sicily area during spring 1995. *Deep Sea Res. I*, 1671–1703
- Tsimplis M.N., Proctor R., Flathier R.A. 1995. A two-dimensional tidal model for the Mediterranean Sea. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100(C8), pp 16223-16239. <http://dx.doi.org/10.1029/95JC01671>
- Zaara Chadia. 1996. Etude de la stabilité du littoral du golfe de Hammamet mémoire de fin d'étude. Faculté de science de Tunis. 105p.