

## REVUE DE L'HYDRODYNAMIQUE AU LARGE DES COTES TUNISIENNES

Chérif SAMMARI et Slim GANA

Laboratoire d'Océanographie Physique

Institut National Scientifique et Technique d'Océanographie et de Pêche

Rue 2 Mars 1934 - 2025 - Salammô

### ملخص

ان كيفية تغل الكتلات المائية في البحر الابيض المتوسط تم تقييمها في عدة اعمال علمية استعملت فيها القياسات على عين المكان والاستشعار عن بعد او المنطويات الفيزيائية والمعلوماتية. الا ان الخاصيات المتعلقة بالتيارات المائية على طول الشريط الساحلي التونسي لا تزال غامضة. ونظرا لاهمية المصارات الفيزيائية وانعكاسها على عدة ظواهر بيولوجية ورسوبية وغيرها، فان القيام بعدة دراسات تتحتم ويمكن استغلالها على الصعيد العلمي والاقتصادي والاستراتيجي. في هذه الدراسة، بعد ان نذكر باهم الخاصيات الفيزيائية للبحر الابيض المتوسط نقدم بسطة تتعلق بديناميكية الشريط الساحلي التونسي وخاصة السواحل الشمالية وخليجي الحمامات وقابس. في الاخير نقترح سلسلة من الاعمال التي يجب القيام بها والتي من شأنها ان توضح اكثر الظروف الفيزيائية التي يتميز بها الشريط الساحلي التونسي.

### Résumé

Le mode de fonctionnement de la Méditerranée est en partie élucidé grâce à un nombre important de travaux mettant en oeuvre diverses techniques complémentaires, comme l'observation *in-situ*, l'observation satellitaire, la modélisation physique et numérique. En revanche, les caractéristiques hydrodynamiques de la circulation des eaux au large des côtes tunisiennes demeurent méconnues. Une série d'étude détaillées seraient très utile sur les plans scientifique, économique et stratégique compte-tenu de l'incidence reconnue des processus physiques sur de nombreux phénomènes biologiques, sédimentaires et autres.

Après avoir rappelé quelques traits remarquables de l'océanographie physique de la Méditerranée, nous présentons quelques particularités des trois principales entités qui constituent les eaux territoriales tunisiennes à savoir les côtes nord et les golfes de Hammamet et Gabès.

Une stratégie d'action à entreprendre est suggérée pour clarifier les conditions hydrodynamiques et météo-océaniques prévalant le long des côtes tunisiennes.

**Mots clés :** Méditerranée, circulation générale, variabilité, marée

## *Abstract*

How the Mediterranean works is partly understood following the large number of work that involve different but complementary techniques. Those techniques indeed range from in-situ and satellite observations to physical and numerical model simulation. However, water characteristics and circulation in some coastal regions are still poorly known, in particular, the hydrodynamical characteristics of water circulation off the Tunisian coasts. Detailed studies will generate benefits on scientific, economical and strategic plans due to strong impact that physical processes have on a large number of biological, sedimentological and other phenomena. We first recall the main features of water characteristics and circulation in the Mediterranean. We then present some characteristics inherent to the three principal water bodies forming the Tunisian territorial waters : North coast, gulf of Hammamet and gulf of Gabès. An acting strategy is suggested to clarify hydrodynamical water characteristics and ocean-atmosphere interactions along the Tunisian coasts.

*Key words* : Mediterranean, general circulation, variability, tide.

## **I - INTRODUCTION**

La circulation des eaux le long des côtes tunisiennes est la résultante de divers processus hydrodynamiques locaux (upwelling, courants côtiers, etc.) et à plus grande échelle (circulation générale, marée) c'est-à-dire à l'échelle du bassin Méditerranéen qui interagissent entre eux et sont caractérisés par une variabilité spatio-temporelle importante. Pour estimer, de la façon la plus réaliste, les différentes grandeurs qui caractérisent l'hydrodynamique côtière et en appréhender leur variabilité il est nécessaire de disposer d'une image précise de la circulation générale de la Méditerranée et de données issues d'un réseau d'observations (hydrologie, courantométrie et marégraphie) spécifique aux études côtières. Une estimation précise de la circulation côtière constitue un élément primordial pour l'élaboration d'un système de gestion durable du littoral. En effet, l'urbanisation et le développement économique conduisent à une forte sollicitation des eaux côtières. Les rejets d'effluents divers d'origine urbaine ou industrielle, les activités liées aux exploitations aquacoles et touristiques contribuent collectivement à la détérioration de la qualité des eaux, pour atteindre par endroits des niveaux proches de la saturation (golfe de Tunis, zone côtière de Khniss, golfe de Gabès). La mise en place de programmes d'études pluridisciplinaires à caractère régional et global peuvent conduire à la compréhension des divers processus océanographiques qui gouvernent les mouvements et les mélanges des eaux.

De nombreux programmes de recherche, soutenus par des organisations internationales, sont actuellement en cours de réalisation. Chacun de ces programmes est sensé apporter une contribution complémentaire, compte-tenu des méthodes utilisées, des processus étudiés ou de la

sous-région investigée, dans l'effort déployé pour l'appréhension de l'environnement physique méditerranéen. Pour avoir à l'esprit la multitude et la complexité des aspects qui doivent être appréhender, nous citerons quelques-unes des expériences menés dans le cadre du programme "Marine Science and Technology" (MAST, Commission Européenne), comme, OTRANTO (hydrodynamique et géochimie dans le détroit d'Otranto), EUROMODEL (Surveillance Hydrologique et Dynamique des Bassins Régionaux et des Détroits), GEODYME (Signature Physique et Biogéochimie des eaux intermédiaires et profondes), EUROMARGE (Flux et cheminements des éléments biogéochimiques dans l'eau et entre l'eau et les sédiments dans les bassins Nord Baléares et Adriatique) ou encore THETIS (Système Tomographique pour le monitoring du bassin Méditerranéen Ouest).

Il n'en est pas de même pour les aspects hydrodynamiques le long des côtes tunisiennes où exceptées des actions sporadiques et pour la plupart concentrées sur le golfe de Gabès, aucun programme adéquat n'a été élaboré comme le prouve aisément le manque de références, fiables, à ce sujet.

Nous décrivons dans ce document les caractéristiques de la circulation à l'échelle de la Méditerranée et plus particulièrement au large des côtes tunisiennes. Nous présentons ensuite les particularités hydrodynamiques de la région nord et des golfes de Hammamet et de Gabès, qui constituent les principales zones du domaine maritime tunisien. Compte-tenu des connaissances actuelles, une stratégie d'action, ainsi que les techniques et les moyens pouvant être développés pour sa mise en oeuvre seront proposées dans le chapitre 5.

## II - LA CIRCULATION GENERALE EN MEDITERRANEE.

La circulation générale à l'échelle d'un domaine comme la Méditerranée est, dans la plupart des cas, le principal facteur régissant la circulation sur le plateau continental et en zones côtières. Elle est donc à l'origine de la distribution des caractéristiques hydrologiques, biologiques, chimiques, sédimentologiques et de pollution des différentes masses d'eau. Il est dès lors utile d'avoir à l'esprit une image synthétique du mode de fonctionnement hydrodynamique de l'ensemble de la Méditerranée.

La force principale qui contrôle la circulation générale des masses d'eau en Méditerranée résulte de son caractère de "bassin de concentration". Par différents mécanismes thermodynamiques (évaporation, transports, formation d'eau profonde en hiver,...) la méditerranée fabrique une eau relativement dense qui occupe 70% de la totalité du bassin (MILLER et STANLEY, 1965) pour finalement s'écouler vers l'Atlantique. Les flux de sens opposés dans le détroit de Gibraltar sont dus à des gradients horizontaux de pression dirigés vers la Méditerranée dans la couche de surface et vers l'Océan dans la couche profonde.

L'évolution spatiale de la densité sur la verticale montre un mouvement généralement orienté vers l'Est dans les couches de surface, alors que, dans les couches intermédiaires, le mouvement dominant est dirigé vers l'Ouest. Cependant, la force de Coriolis tend à générer des trajectoires

cycloniques dans les différents sous-bassins, commençant par le détroit de Gibraltar pour les eaux de surface, par le bassin nord-est Levantin pour les eaux intermédiaires, et finalement par les différentes sources d'eaux profondes (Golfe du Lion par exemple) pour les eaux profondes. Mais il y a des exceptions notables à ce schéma, en particulier dans les eaux de surface: des gyres anticycloniques existent à l'ouest de la Mer d'Alboran, en plusieurs endroits le long de la côte algérienne, dans le Golfe de Syrte. De plus, plusieurs tourbillons existent dans la partie centrale des différents bassins, et en particulier dans le bassin Ionien.

Les vents, cependant, très irréguliers dans leur intensité et dans leur distribution spatiale et temporelle influencent la circulation générale, en particulier, dans les régions sur lesquelles soufflent des vents forts et réguliers: la "*Tramontane*", par exemple, occupe un rôle majeure sur la partie ouest du Golfe du Lion et le long de la côte nord-est de l'Espagne.

La salinité de l'eau atlantique croît à mesure qu'elle progresse vers l'Est pour parvenir aux côtes du Moyen-Orient. L'eau chaude et salée que l'on rencontre à la surface entre les îles de Rhodes et de Chypre à la fin de l'été, connaît une intense évaporation suivi d'un refroidissement en hiver dû aux vents secs et froids émanant des hauts plateaux de Turquie. Ces effets atmosphériques induisent des mélanges dans les 150 à 200 premiers mètres, dont il résulte la formation d'une masse d'eau type: l'eau Levantine ( $T=15.7^{\circ}\text{C}$ ,  $S=39.1$  psu,  $\sigma_t=29,00$ ) qui s'écoulent dans tout le bassin Est autour de 300 mètres de profondeur. Cette eau intermédiaire se dirige lentement vers l'Ouest. Au moment où elle traverse le Canal de Sicile, affectée par les mélanges avec les eaux adjacentes, ces caractéristiques moyennes sont alors  $T=14.0^{\circ}\text{C}$ ,  $S=38.75$  psu. Cette eau alimente le bassin Ouest en rejoignant le mouvement cyclonique de la circulation générale à une profondeur intermédiaire juste au dessous l'eau Atlantique et dessus de l'Eau Profonde.

L'organisation globale de cette circulation correspondant aux caractéristiques décrites ci-dessus confèrent au bassin, en vertu des lois de l'hydrodynamique, une dissymétrie Nord-Sud en particulier dans bassin occidental. En effet, la circulation est très turbulente le long du continent africain et relativement stable le long du continent européen. D'un côté, la turbulence accélère la dispersion des polluants et des nutriments et favorise en particulier un développement relativement important de toute la chaîne alimentaire. De l'autre côté, une circulation faiblement énergétique est peu favorable pour le développement des processus biologiques et pour la dispersion de produits polluants.

### *II.1. Circulation de l'eau atlantique*

Les grands traits du cheminement de l'eau d'origine atlantique sont globalement bien représentés sur les schémas les plus courants (figure. 1, Ovchinnikov, 1966). Le problème réside dans la forte variabilité spatiale et temporelle qui caractérise cet écoulement et dont l'estimation est souvent biaisée. Cette variabilité se manifeste, en particulier, par deux types de phénomènes, les zones frontales et les structures turbulentes de moyenne échelle. Autrement dit, la circulation générale réelle n'est pas à l'image des lignes de courant se contractant dans les détroits ou s'épanouissant dans les bassins successifs; les courants qui animent les eaux superficielles sont

fortement instables, forment des méandres qui génèrent des tourbillons, qui peuvent venir ensuite interagir avec eux.

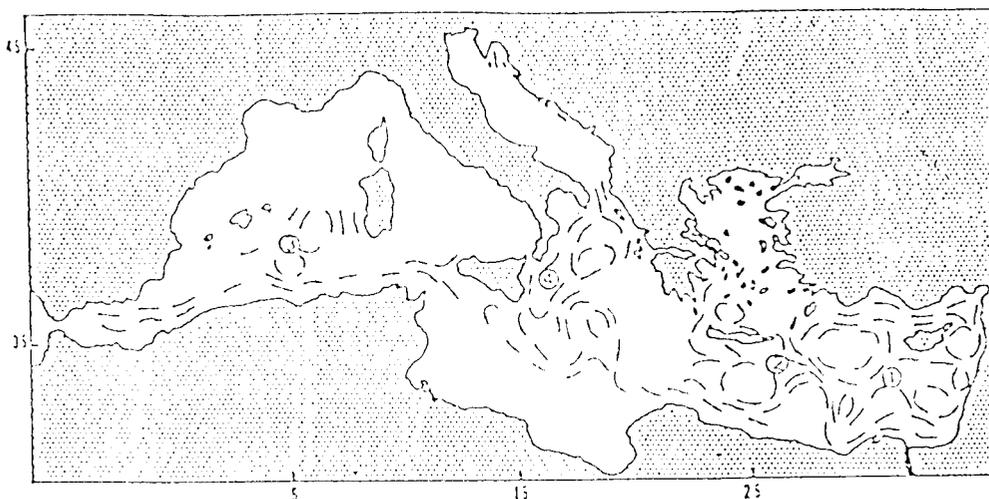


Figure. 1. Circulation des eaux de surface. Dans Ovchinnikov, 1966.

La circulation de l'eau d'origine atlantique, entre le Déroit de Gibraltar et le canal de Sicile, présente des caractéristiques fondamentalement différentes selon que l'on se trouve au large des côtes marocaines, algériennes ou tunisiennes. A l'ouest, cette circulation est relativement stable et étroitement liée à la géomorphologie du déroit de Gibraltar et de la mer d'Alboran. A la sortie de cette mer, la circulation est, généralement, dirigée des côtes espagnoles (2°W) vers les côtes algériennes (1°W); cette circulation prend ensuite la forme d'une veine de courant qui coule vers l'Est le long de la côte africaine et devient généralement instable à partir de 1-2°E (Millot, 1985). Des méandres puis des tourbillons cycloniques et anticycloniques se développent; les tourbillons dérivent vers l'Est à des vitesses de quelques  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , mais seuls les anticycloniques croissent jusqu'à atteindre un diamètre de l'ordre de 100 km (figure. 2). Ils s'éloignent ensuite de la côte et sont parfois repérés sur des thermographies pendant plusieurs mois, ils peuvent alors atteindre des dimensions de plus de 200 km et revenir vers la côte pour interagir avec la veine de courant (Taupier-Letage et Millot, 1987).

Garzoli *et al.*, (1979, 1981) ont observé deux tourbillons dont la permanence n'est pas vérifiée et ont émis l'hypothèse de la séparation de la LIW en deux branches au sud de la Sardaigne, l'une parallèle aux côtes africaines, l'autre à la côte est Sarde.

Le canal de Sardaigne est la région la moins étudiée de la Méditerranée occidentale. Néanmoins, des résultats plus récents basés sur l'analyse des données de la campagne MEDIPROD5 <sup>(1)</sup>, (Benzohra et Millot, 1993) suggèrent qu'une partie de LIW coule vers l'est le long du talus algérien, ce qui contredit les résultats de Garzoli et Maillard (1979). Il est tout à fait plausible de

<sup>1</sup>MEDIterranée PRODUCTION

penser que la circulation des eaux qui est généralement parallèle à la côte tunisienne peut certainement lui devenir perpendiculaire en présence d'un tourbillon, et entraîner à la côte des mouvements verticaux qui influenceront directement la distribution des sels nutritifs et de la biomasse phytoplanctonique. Ces tourbillons entraînent l'eau d'origine atlantique des côtes algériennes vers le large, leur influence pouvant se faire sentir loin vers le nord. En revanche, leur progression vers l'est est empêchée par le développement du plateau continental le long des côtes tunisiennes. Ils perturbent ainsi la circulation de l'Eau Levantine Intermédiaire (Millot, 1987-b) s'écoulant à partir du bassin Est.

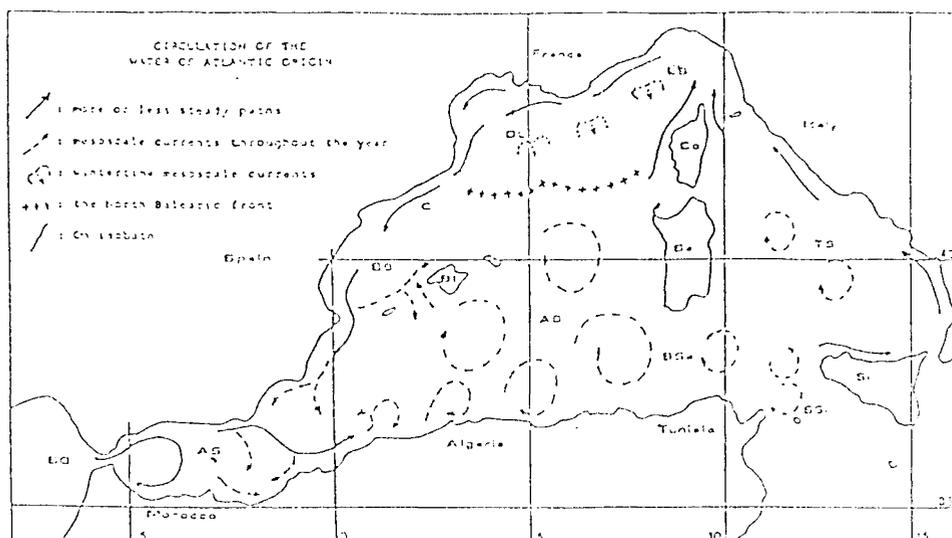


Figure. 2. Circulation de l'eau d'origine atlantique. D'après Millot, 1987-a.

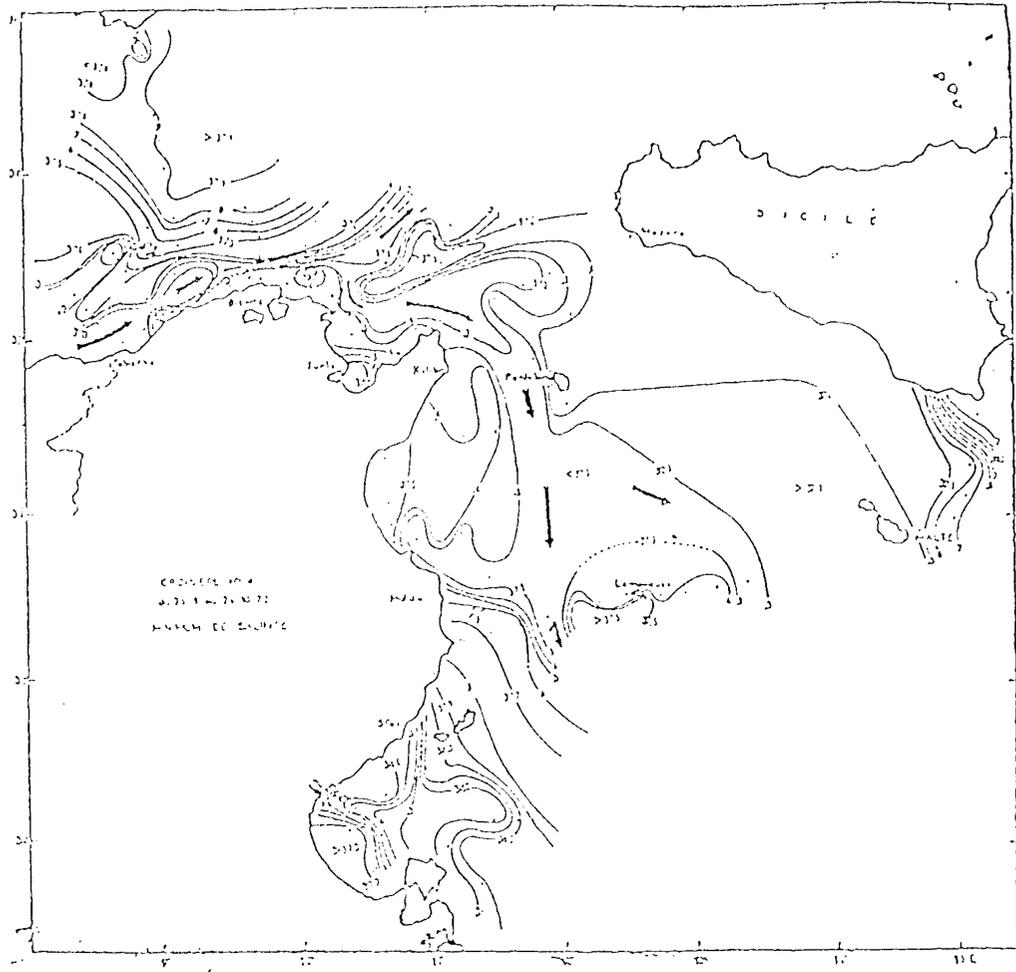


Figure. 3. Distribution horizontale du minimum de salinité et écoulement du courant atlantique. D'après Brandhorst (1977).

Quant au mode d'écoulement du courant atlantique le long des côtes tunisiennes, il a été esquissé par Brandhorst (1977). En se basant sur la distribution horizontale du minimum de salinité (37.2-37.3 psu), cet auteur a pu établir que la veine du courant atlantique, intéressant les 200 premiers mètres, contourne le Cap Bon et s'oriente vers le Sud. Au nord de Lampedusa ce courant se scinde en deux branches: la première se dirige vers le Sud-Est en laissant l'île à l'Ouest alors que la seconde s'oriente vers le Sud et va alimenter la circulation au large du golfe de Gabès (figure. 3).

Dans le canal de la Galite, Brandhorst suggère que l'enfoncement des surfaces d'isopycnales indique, soit un "cascading" des eaux plus lourdes sur le rebord du canal, soit un fort courant vers l'est sur son flanc méridien. Des forts courants de fonds capables d'entraver les opérations de chalutage, ont été souvent observés dans cette zone. Au niveau du détroit de Sardaigne, la diminution des isopycnes ( $\sigma_t$ ) de surface vers le sud, indique une intensification du courant atlantique à mesure que l'on s'approche de la côte tunisienne. Mais plus près de la côte (10 milles) la répartition des valeurs de  $\sigma_t$  s'inversent, indiquant la présence d'un contre-courant local dirigé vers l'est.

## *II.2. Circulation de l'eau levantine intermédiaire*

En ce qui concerne la circulation générale de LIW, son étude est plus aisée puisque ses caractéristiques hydrologiques la rendent facilement identifiable. Il est facile de déceler la présence de LIW car son influence est partout caractérisée par des maxima de température et de salinité allant de 14.10°C et 38.75 psu dans le Canal Siculo-Tunisien à 13.25°C et 38.50 psu dans le détroit de Gibraltar (Guibout, 1987); en dehors de la veine principale, les maxima intermédiaires peuvent être sensiblement plus faibles. La densité de LIW est intermédiaire entre celle de l'eau superficielle d'origine atlantique et celle de l'eau profonde formée en hiver dans le nord du bassin occidental. LIW n'a pas de variations saisonnières très marquées dans le détroit de Sicile mais elle présente une très forte variabilité saisonnière le long des côtes espagnoles (Font *et al.*, 1988) et dans le détroit de Gibraltar. C'est qu'en effet elle intervient de manière déterminante dans des processus aussi fondamentaux que la formation de l'eau profonde, qu'elle subit tout au long de son trajet les effets de mélanges et qu'elle peut être entraînée par divers phénomènes de plus ou moins grande échelle.

En première approximation, la circulation de LIW résulte d'un équilibre entre gradient de pression et force de Coriolis avec, pour conditions aux limites, une entrée par le Canal de Sicile et une sortie par le Détroit de Gibraltar; avec de telles hypothèses, le rôle joué par la bathymétrie au niveau de la pente continentale devrait être déterminant.

En se basant sur ces hypothèses, qui il faut le rappeler sont cohérentes avec l'analyse des données existantes, Millot, 1987-a, (Fig. 4) a proposé un schéma de circulation relativement simple et donc facile à vérifier. Dans ce schéma, une veine principale longe les côtes d'Italie, de France et d'Espagne, et les poches de LIW rencontrées dans le Bassin Algérien ont été entraînées là, depuis les côtes de Sardaigne, par des tourbillons de moyenne échelle (Millot, 1987-b). Nous pouvons souligner le rôle joué par la Mer Tyrrhénienne, dont la LIW fait pratiquement le tour complet, et dans laquelle, en partie à cause d'une circulation générale peu intense, le phénomène de double diffusion au niveau de LIW entraîne une nette stratification des couches profondes. Notons enfin que le schéma proposé par Millot est très différent de celui élaboré par Wüst (1961) (figure. 5).

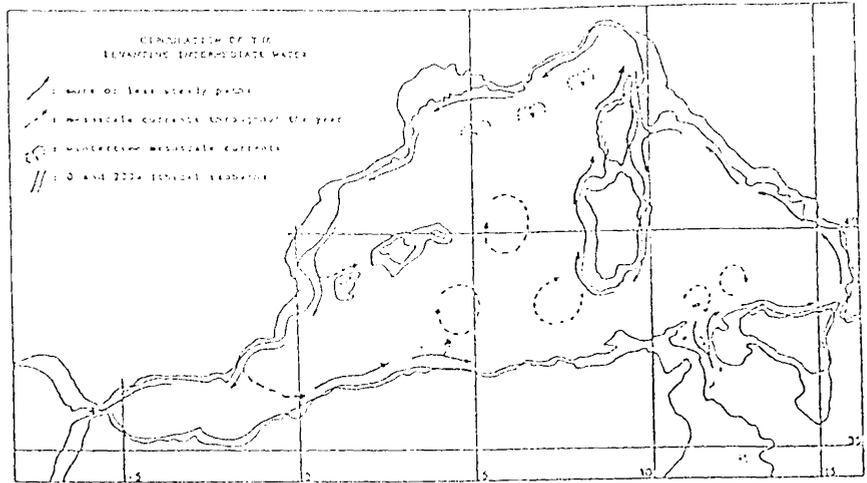


Figure. 4. Circulation de l'eau Levantine Intermédiaire. D'après Millot, 1987-a et Benzohra et Millot, 1995-a.

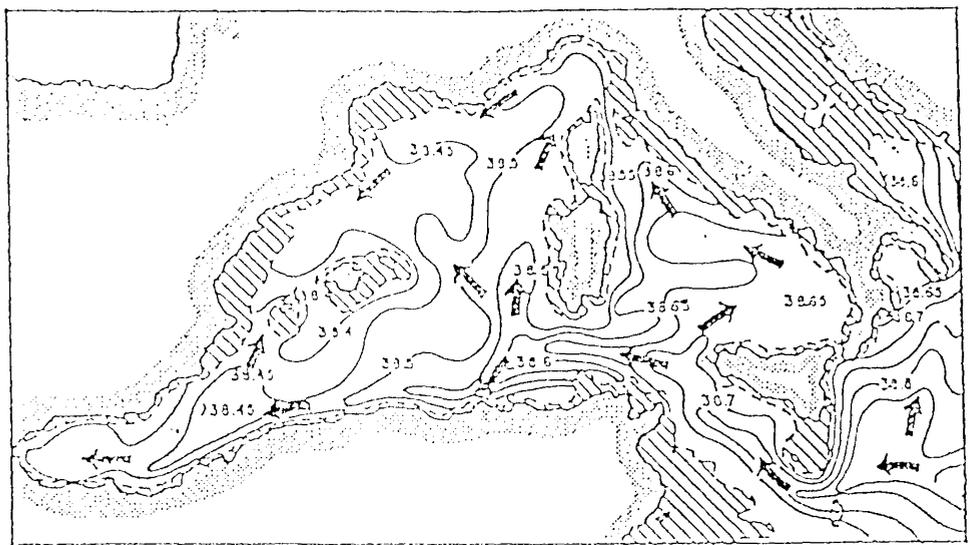


Figure. 5. Circulation de l'eau Levantine Intermédiaire. D'après Wüst (1961).

Toutefois, le devenir de la LIW au delà du Canal Siculo-Tunisien demeure un point de discord. En effet, trois chemins de sortie sont plausibles pour LIW (Lacombe et Tchernia, 1972):

- Une branche recirculant autour de la mer Tyrrhénienne et qui ressortirait par le canal de Sardaigne au sud-est de cette île.
- Une branche qui entrerait directement dans le Canal de Sardaigne sans recirculer.
- Une branche qui s'évacuerait vers la mer ligure en passant par le canal de Corse.

Toute la problématique actuelle consiste à définir les proportions relatives de ces trois branches.

### III - PARTICULARITES HYDRODYNAMIQUES DU DOMAINE MARITIME TUNISIEN

#### III. 1. LES COTES NORD -TUNISIENNES

##### 1.a Caractéristiques hydrologiques et météo-océaniques

##### - Hydrologie

Les valeurs de température et de salinité enregistrées durant les campagnes menées par Azouz (1969-1971), au large de Tabarka sont représentatives des conditions hydrologiques caractérisant les eaux véhiculées par le courant d'origine atlantique, qui envahissent la quasi-totalité du canal de la Galite. Les conditions hydrologiques typiques en surface sont indiquées dans le tableau suivant:

	T (°C)	S
Printemps	15.5	37.2
Eté	23	37.5
Automne	19.5	36.9
Hiver	14.5	36.8

##### - Vents

Les vents dominants dans la région nord sont de secteur ouest à nord-ouest et représentent 40% des occurrences. Les vents de secteurs nord à nord-est soufflent durant 20% du temps. Au printemps et en été, les vents de secteur Est deviennent plus fréquents. Les vitesses des vents restent inférieurs à 8m/s dans 90% du temps.

## 1.b - Courantologie, Houle et Marée

### - Courants

Les courants qui intéressent les côtes nord tunisiennes sont principalement les *courants généraux et liés au vent*, les *courants littoraux* ou *de houle*, et dans une bien moindre proportion les courants de marées.

La circulation le long des côtes nord-tunisiennes doit être considérée comme partie intégrante des différents mécanismes hydrodynamiques affectant la région délimitée par la Tunisie, le canal de Sardaigne et le détroit de Sicile. Cette région forme la jonction entre trois sous-ensembles majeurs de la Méditerranée: le bassin Algéro-Provençal à l'ouest, la Mer Tyrrhénienne au nord et Méditerranée orientale à l'Est (bassin Ionien). Les transferts de masses d'eau de l'un de ces trois sous-ensemble vers les deux autres, sont contrôlés à travers cette région commune. De l'eau d'origine atlantique (MAW) y est apportée par le Courant Algérien à travers le canal de Sardaigne sous la forme d'un courant plus ou moins diffus (Millot, 1987). Bien que l'on sache, depuis longtemps, qu'une partie de cette eau passe en Méditerranée orientale (Ovchinnikov, 1966; figure 1) après avoir longé les côtes nord-tunisiennes, l'estimation quantitative du flux reste très imprécise. Il en est de même pour l'eau levantine intermédiaire (LIW) provenant du bassin oriental et qui pénètre dans la région en longeant la Sicile par l'ouest.

Dans une étude menée par Azouz (1969), l'auteur conclue, à juste titre, que l'étude hydrologique des côtes nord de la Tunisie nous a révélé des phénomènes complexes qui a eux seuls mériteraient une étude approfondie. Azouz, précise que la région - de morphologie très tourmentée, hérissée de hauts fonds, d'écueils, percée de nombreux chenaux - est soumise essentiellement à deux influences de sens opposés, celle des eaux superficielles d'origine atlantique dont le maximum d'extension a lieu en hiver et celle des eaux du bassin oriental qui semblent remonter vers la surface du printemps à l'été. Il resterait à préciser la nature et la direction des courants qui jouent un rôle important dans la répartition des masses d'eaux.

### - Houle

La houle provient de la propagation d'une onde engendrée sur des surfaces marines lointaines par des vents suffisamment forts et doit être différenciée de la "mer de vent" qui à pour origine une source locale de vent.

Une houle déferlant sur une plage avec une certaine obliquité donne naissance à un courant parallèle au rivage dont le sens est celui de la composante suivant le rivage de la célérité des lames. Ce courant, désigné le plus souvent par "courant littoral", reste principalement localisé dans la bande comprise entre le point de déferlement et la côte. C'est ce courant qui est à l'origine du transport des sables remis en suspension par la houle. Il est fonction de la pente de la plage, de l'amplitude de la houle au déferlement, de sa période et de l'angle entre la direction de propagation et la normale à la plage.

*Les fetchs* (étendue de la zone d'action du vent) de la côte Nord sont:

secteur Nord à Nord-Est: 570 km (5°), 510 km (45°), 600 km (70°)

secteur Ouest à Nord-Ouest: 825 km (270°), 570 km (290°), 510 km (310°), 710 km (335°)

Les houles au large sont de provenances dominantes ouest et nord-ouest. Les hauteurs significatives probables  $H_s$  d'après les observations au large sont les suivantes:

$H_s(1an) = 5.6\text{ m}$                        $H_s(10ans) = 7.8\text{ m}$                        $H_s(100ans) = 10\text{ m}$

Les houles les plus actives sur les plages proviennent des secteurs Nord-Ouest ( $T=13s$ ) et Nord-Est ( $T=11s$ ), et subissent des réfractions aux abords du rivage.

#### - Marée

Sur la côte nord, la marée est principalement semi-diurne et le marnage maximum observée au cours de quatre mois au niveau de Tabarka (BCEOM, 1960) a été de 0,45m. Les courants de marée sont faibles ( $v=10\text{ cm/s}$ ) et sans action sur la dynamique sédimentaire.

### III. 2. LE GOLFE DE TUNIS

#### 2.b - Hydrologie et Courantologie

Dans la région du Golfe de Tunis qui a été étudiée par Lubet et Azouz (1969), les salinités restent relativement basses toute l'année et voisines de 37 p.s.u. Les eaux atlantiques y pénètrent en hiver et au printemps, en été et en automne les eaux de mélange (salinités comprises entre 37 et 37,5 p.s.u.) dominant. Les eaux du golfe de Tunis ne sont pas soumises à l'action de courants permanents. Seuls les vents dominants de la côte ouest peuvent provoquer la formation de mouvements giratoires locaux dans la baie de Gammarth. Il existe toutefois au nord du golfe et dans le détroit siculo-tunisien, un courant de surface NO-SE évalué par Guyot (1951) à 0,8 noeud et qui entraîne les eaux superficielles vers le bassin oriental de la Méditerranée.

Parmi les tentatives de description qualitative de la courantologie du Golfe de Tunis, nous citerons le travail de Belkhir et Hadj Ali Salem. Ces auteurs, écrivent en substance:

*Les vents, peu forts, soufflant du secteur N-NE ont tendance à pousser les eaux marines du large vers les côtes S-SO. Les eaux marines rencontrent au milieu de l'axe joignant cap-Carthage à ras-Dourdas un courant d'eau plus chaud et hyposalin venant du secteur littoral opposé S.O. Ce flux côtier prend naissance au voisinage de l'oued Méliane, longe les côtes ouest du Golfe de Tunis jusqu'à cap Carthage où il rencontre les eaux marines qui le divisent en deux branches dont l'une remonte vers le N.O. et surmonte une couche d'eau de direction opposée traduisant un contre courant profond venant du N.O.; ce contre courant renforce la deuxième branche du flux côtier, lui imposant sa direction N.O.-S.E. vers les côtes de Sidi Errats - Korbous où il remonte avec une force suffisante pour pousser les eaux chaudes thermales hyposalines qui, à leur tour, rencontrent au large le flux d'eau marine. Arrivées au large, les eaux thermales rencontrent un flux d'eau marin de sens opposé induit par les vents N-NE., plongent en profondeur et expliquent, de ce fait la présence d'une couche d'eau plus chaude et moins saline détectée à une profondeur de 5-10 m dans la zone II (zone centrale du petit Golfe de Tunis, en bordure immédiate de la zone côtière).*

Cette description dénote du caractère flou et imprécis de l'image que l'on peut se faire de la circulation à l'échelle du Golfe de Tunis, en l'absence de réseaux d'observations spécifiques aux différents processus physiques que l'on cherche à appréhender. Une opération intensive sur le Golfe de Tunis serait fortement utile pour comprendre les différents processus hydrodynamiques (forçage éolien, forçage thermique et thermohalin, ...) contribuant à la circulation des eaux.

### *III. 3. LE GOLFE DE HAMMAMET*

Le Golfe de Hammamet se trouve au voisinage immédiat du détroit siculo-tunisien, détroit au travers duquel s'effectuent les échanges entre les 2 bassins de la Méditerranée. L'existence de courants dans les détroits tient aux différences de niveau et de densité qui existent généralement de part et d'autre (Defant, 1961). Le régime hydrodynamique des détroits joue donc un rôle important dans la circulation des bassins adjacents.

Les échanges entre les bassin occidental et oriental sont véhiculés d'une part, par une veine d'eau d'origine atlantique (Mediterranean Atlantic Water), relativement peu salé s'écoulant vers le Sud-Est entre la surface et 200 m de profondeur, et d'autre part, par une veine d'eau Levantine intermédiaire (LIW), circulant vers le Nord-Ouest entre 200 m et le fond.

Compte-tenu de sa situation géographique et de la profondeur de la colonne d'eau, le Golfe de Hammamet est plus spécifiquement concerné par l'eau d'origine atlantique (MAW) que par la LIW. La MAW longe les côtes africaines avant de contourner le banc des Eskerkis où elle se scinde pour former une première branche qui longent les côtes nord siciliennes en direction de la mer Tyrrhénienne, et une deuxième qui pénètre dans canal de Sicile en contournant le Cap Bon (Garzoli et Maillard, 1979; Morel, 1971). La recirculation de l'eau d'origine atlantique dans le Golfe de Hammamet est quant à elle relativement méconnue. En effet, des données in-situ obtenues avec une résolution spatio-temporelle adéquate sont quasi-inexistantes. Bien que devant être validées a posteriori par des observations in-situ, les sorties de modèles numériques de circulation générale, comme par exemple celui implémenté en Méditerranée par le groupe POEM (Physical Oceanography in the Eastern Mediteranean, 1992) ou "EUROMODEL", fournissent quelques aspects a priori de la circulation locale dans le Golfe de Hammamet. Pour les besoins de notre d'étude nous avons examiné des extrait des fichiers de sorties du modèle "EUROMODEL" (Herbaut, 1994), des cartes de courants relatifs à notre zone d'étude, prévalant au mois d'août et de février. Ce modèle tridimensionnel, aux équations primitives est forcé par un vent réaliste, par les flux verticaux air-mer et par les flux horizontaux aux détroits. Au large du Golfe d'Hammamet, le modèle restitue bien l'écoulement de la veine d'eau Atlantique. A quelques dizaines de miles de la côte, le courant d'origine atlantique est principalement orienté vers le Sud, valant  $15 \text{ cm.s}^{-1}$  en surface et  $10 \text{ cm.s}^{-1}$  à 40 m de fond. Dans le Golfe de Hammamet proprement dit, on identifie une recirculation cyclonique à 40 m de profondeur de la MAW, avec des vitesses horizontales de 1 ou  $2 \text{ cm.s}^{-1}$ . En période estivale, les eaux du golfe de Hammamet sont ainsi régénérées par la veine d'eau d'origine atlantique. En période hivernale, la

convergence apparente des eaux de surface vers les côtes du golfe et l'écoulement vers le sud-est des eaux du fond, laisse supposer l'établissement d'un brassage vertical durant cette saison.

Les travaux de Brandhorst (1977), montre qu'en Été (figure. 6a-b), la colonne d'eau au large du golfe de Hammamet (dans un rayon de 20 km) présente une forte homogénéité en température ( $T \sim 22^{\circ}\text{C}$ ) et salinité ( $S \sim 37.1$  psu). Néanmoins, on peut noter (figure 7-c) un affleurement des isopycnes ( $25.8 < \sigma_t < 26.2$ ), qui, dans l'hypothèse d'un écoulement advectif, très faiblement diffusif conservant la densité potentielle, peut favoriser une remontée d'eau (et donc de particules) du fond ( $\sim -50$  m) vers la surface, et ce en direction du large.

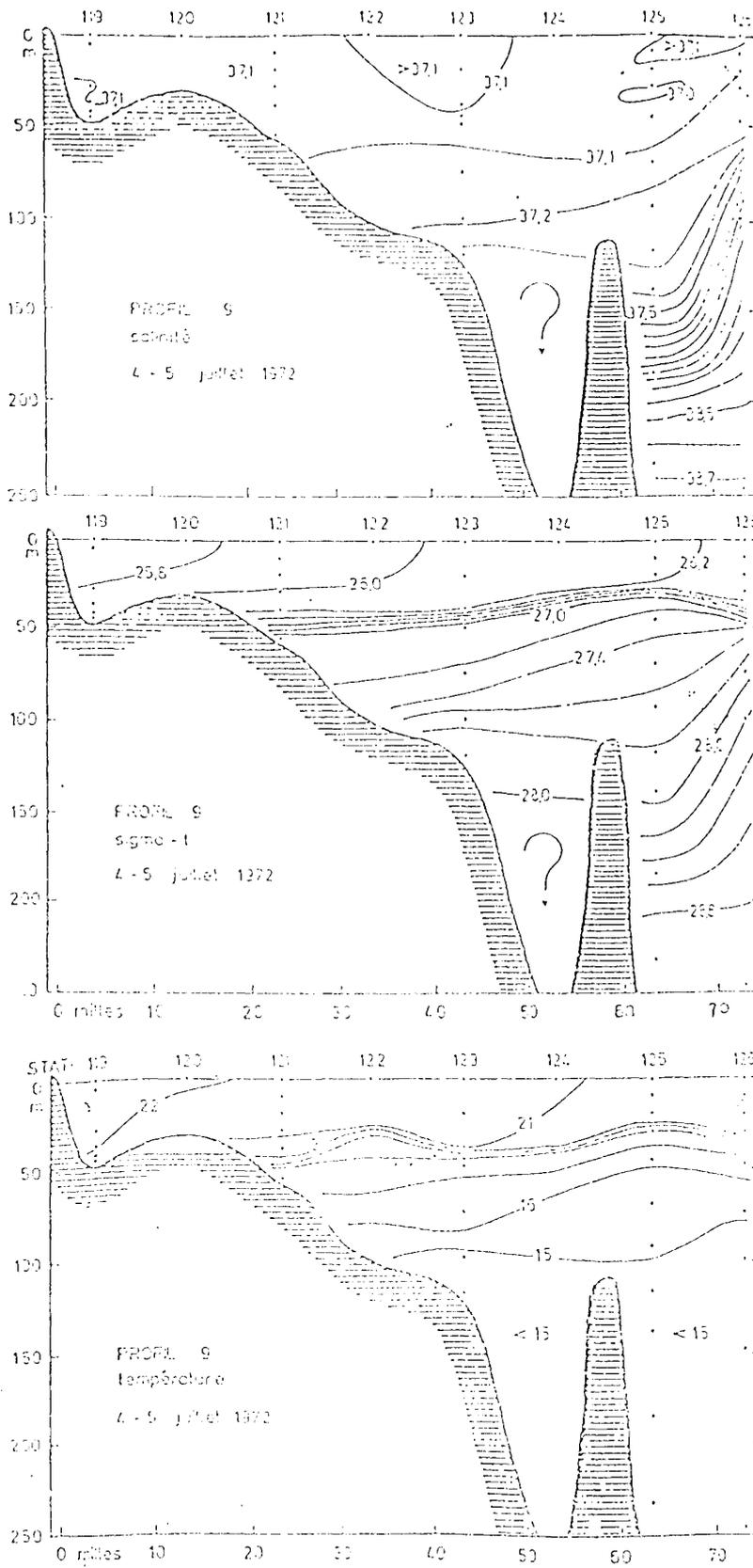


Figure. 6a-c. Distribution de la température, de la salinité et de sigma- $\theta$   
D'après Brandhorst (1977).

Par ailleurs, le golfe de Hammamet est soumis à l'action de vents dominants de secteur NE pouvant atteindre 30 à 35 noeuds et dépassant rarement les 40 noeuds. La profondeur étant comparable à l'épaisseur de la couche d'Ekman (cf. annexe 2), nous pouvons affirmer que, théoriquement, les transports induits par des vents du Nord (Nord-Est ou Nord Ouest) engendreront un transport dirigé plutôt vers l'Ouest, favorisant ainsi le transport de la matière en suspension vers la côte.

### - Marée

La quantification des phénomènes associés à la marée (amplitude, phase) dépend de la géomorphologie du bassin et reste tributaire de mesures directes recueillies à l'aide de marégraphes. Les seules marégraphes en fonctionnement le long des côtes tunisiennes sont localisés aux ports de La Goulette, Sfax et Gabès. Il n'existe pas d'enregistrements marégraphiques dans le Golfe de Hammamet. Néanmoins, des modèles numériques de marée, calés sur des observations in-situ, notamment celles recueillies aux ports précédemment cités, permettent d'extrapoler objectivement les amplitudes et les phases dans le golfe de Hammamet. Ainsi, d'après les travaux de Molines (1992), nous pouvons estimer l'amplitude de la marée dominante M2 (composante lunaire semi-diurne, de période 12h42mn) à 4 cm et la phase à 40° (figures. 7a-b). Le point amphidromique local, c'est-à-dire là où, à la fois, l'amplitude de marnage est nulle et où le courant de marée est maximum est situé au centre du canal de Sicile. Le courant décroît à mesure que l'on s'approche du Cap-Bon, où compte-tenu de l'allure des lignes cotidales, un point amphidromique virtuel pourrait exister. Autrement dit l'on doit s'attendre à un très faible courant de marée le long de la côte sud du Cap-Bon.

Selon les résultats de Vincent (1992), l'hodographe associé à la marée M2 à proximité des côtes sud du Cap-Bon, est une ellipse dont le demi grand-axe, indiquant la direction principale du courant, est orienté vers l'Est.

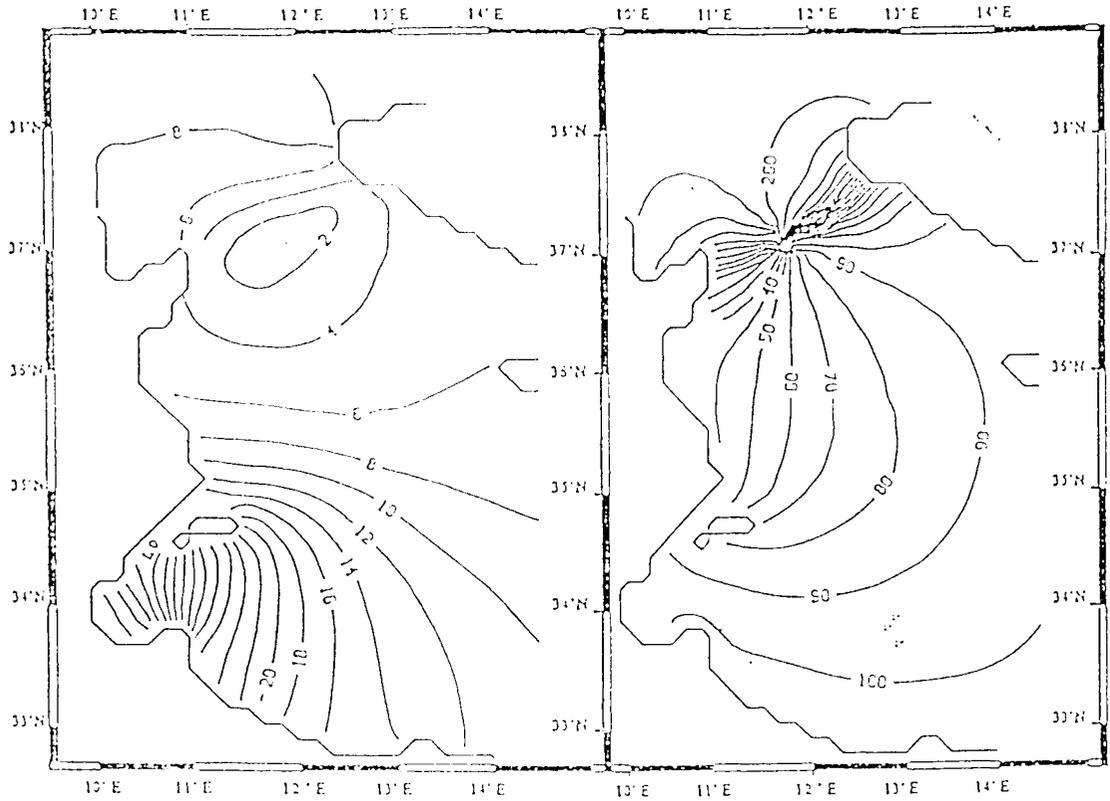


Figure. 7a-b. Cartes cotidiales de la marée M2. Les phase (°) sont données par rapport aux heures locales (TU-1). Les lignes sont espacées de 2 cm pour les amplitudes et 10° pour les phases. D'après Molines (1992).

**- Houle**

La côte Est de la Tunisie tourne le dos aux principaux axes de perturbations. Ainsi malgré des fetchs potentiellement longs, traversant l'ensemble du bassin oriental de la Méditerranée, les houles présentent des amplitudes et des périodes limitées. En effet, les houles ne peuvent atteindre leur plein développement que lorsque l'axe des dépressions est orienté dans le même sens que les fetchs. Par conséquent, le littoral du Golfe de Hammamet, protégé au nord par le Cap-Bon et au nord-est par la Sicile, est essentiellement soumis aux houles de secteurs Est à Sud-Est. Une étude statistique basée sur des observations directes de la houle à la côte serait la méthode la mieux appropriée pour une estimation objective et précise des caractéristiques de ce paramètre, et notamment pour l'estimation du transit sédimentaire engendré par les courants littoraux de houle, qui sont une donnée essentielle pour la protection des côtes contre l'érosion.

### III. 4. LE GOLFE DE GABES

Diverses missions océanographiques ont intéressées le golfe de Gabès depuis le début du siècle. La campagne menée à bord du "Pourquoi Pas" en 1923 avait pour objet la reconnaissance des caractéristiques du fond. Le Danois (1925), embarqué a bord de la "Tanche", se pencha sur la chalutabilité de la zone. Seurat (1924, 1929a-b, 1934) étudia la biologie de l'étage intercotidal et les formations littorales et estuariaines du golfe de Gabès. Suite à une série de campagnes organisées en 1965 conjointement par l'INSTOP et la Station Marine d'Endoume (Marseille) à bord de la "Calypso" et du "Dauphin", De Gaillande (1970) d'une part et Poizat (1970) d'autre part, publièrent respectivement des études relatives aux peuplements de la zone centrale du golfe et relatives à l'hydrodynamisme et la sédimentation du golfe. Tandis que Ktari-Chakroun et Azouz (1971) s'intéresse à la chalutabilité des fonds du Golfe de Gabès, Ben Othman (1971) publie un article traitant, en plus, de résultats de dragages et d'observations hydrologiques dans le Sud-Est tunisien. Durant les mois de juin-juillet, septembre-octobre 1972 et avril-mai 1973, le Programme de Recherche et de Développement de la Pêche (Brandhorst *et al.*, 1974 - Brandhorst et Messaoud, 1977) a permit la réalisation de trois campagnes hydroacoustiques et océanographiques combinées ayant pour objectif d'élucider les rapports entre les paramètres physico-chimiques du milieu et le potentiel des ressources halieutiques. Ce travail, menée à bord du N/R "Hannoun", peut être considéré comme le premier et l'unique dans le genre, compte tenu de son extension dans l'espace (tout le littoral tunisien) et de sa thématique hydrologique et océanographique. Ce programme a permis de tirer quelques conclusions sommaires positives sur la relation entre les ressources halieutiques et les facteurs du milieu sans toutefois élucider totalement la question en raison notamment du manque d'équipement et de mesures de sels nutritifs et de plancton.

Avec le développement intensif de l'exploitation des carrières de phosphate, l'attention s'est porté, à partir des années 1980, sur les conséquences du phosphogypse rejeté en quantité dans le golfe de Gabès depuis les années 1970. Les effets induit par la présence de phosphogypse - opacité du milieu - et les éléments chimiques qui l'accompagne (phosphore, fluor, métaux lourds,...) ont contribué à l'altération du milieu (Darmoul, 1988). L'enrichissement du milieu aquatique en nutriments favorise - particulièrement par temps calme et chaud - une importante prolifération d'espèces de microalgue qui conduisent à l'apparition du phénomène "d'eau rouge" (Hamza et Ben Maïz, 1990).

Connaissant l'importance des courants et de la composition physico-chimique de l'eau de mer dans les processus de transport, de dispersion et de remise en suspension des éléments nutritifs (application à la pêche), des sédiments (engraissement ou érosion des plages) ou des polluants (suivi des rejets urbains ou industriels, prévention des marées noires), il est aujourd'hui urgent d'entreprendre une étude hydrodynamique complète (courantologie, marégraphie, hydrologie, imagerie satellitaire) d'un certain nombre de sites côtiers sensible, dont le golfe de Gabès afin d'intégrer la composante physique du milieu dans un système d'aide à la protection, à l'aménagement et à la gestion des ressources de ces écosystèmes.

## 4. 2. Aperçu sur les caractéristiques physiques

### a- Hydrodynamique

Comme mentionné plus haut, au nord de l'île italienne de Lampedusa le courant d'origine atlantique se scinde en deux branches: la première se dirige vers le Sud-Est en laissant l'île à l'Ouest alors que la seconde s'oriente vers le Sud et va alimenter la circulation au large du golfe de Gabès. Le flux de la MAW, à travers le détroit Siculo-Tunisien, présentant une variabilité saisonnière bien marquée (Manzella et al., 1988), l'intensité de cette branche est, en conséquence, sujette à des fluctuations qui à leur tour vont directement affecter la circulation au large du golfe de Gabès. En effet, il existe dans cette région une circulation locale cyclonique permanente (Ovchinnikov, 1966; Lacombe et Tchernia, 1972) qui va céder une partie, plus ou moins importante, de ses eaux à la sous-branche du courant atlantique. Il est, néanmoins, difficile de quantifier avec précision les courants au voisinage du site compte tenu du manque de mesures in-situ adéquates.

### b- Hydrologie

Le golfe de Gabès occupe une vaste région d'eau peu profonde ce qui le rend sensible aux effets de chaleur différentielle. En hiver, l'air ambiant, relativement froid, gagne suffisamment de chaleur au détriment de la colonne d'eau pour la rendre isothermale. Cette région peu profonde devient en contraste thermique avec les eaux des régions plus profondes situées à l'Est du plateau. Dans ces régions profondes, la chaleur perdue au profit de l'atmosphère par les couches de surface est remplacée par celle disponible dans les couches plus profondes. En revanche, cette source de chaleur n'est pas disponible dans les eaux du plateau continental - de faible profondeur - et l'eau reste froide. Ainsi, pour que ce phénomène puisse exister, l'épaisseur de l'eau peu profonde doit être plus faible que celle de la couche de mélange. La localisation des fronts correspond à un contour bathymétrique égal à la profondeur de la couche de mélange (40 à 50 mètres) et sont facilement détectables sur les images satellites.

Ce type de phénomène, qui se produit aussi en été, lorsque le mélange dans la région d'eau peu profonde (près de la côte) continue à être plus facile que dans les régions plus profondes, a été observé dans diverses régions en Méditerranée, notamment dans l'Adriatique (Bignami et al., 1990-a, 1990-b), la Mer de Ligurie et la Mer Egée. Il s'agit de l'effet de Sugimoto-Whitehead qui touche essentiellement les plateaux continentaux. La compréhension des mécanismes météo-océaniques qui conduisent à l'apparition et à la persistance de ce phénomène fortement énergétique est une étape essentielle pour appréhender la circulation des eaux du golfe de Gabès et leur taux de renouvellement.

### Courants et marées

Les **courants généraux** interviennent dans le renouvellement des eaux du Golfe de Gabès en y alimentant une recirculation anticyclonique, mais leur incidence côtière est *a priori* limitée. Compte-tenu de l'existence d'un plateau continental étendu, les **courants de marée**, en revanche, sont significatifs et intéressent tout le littoral du Golfe de Gabès. Les dénivellés engendrés par les

marées moyennes enregistrées en différents sites de l'île de Jerba, par exemple, sont reportés sur ce tableau ci-après:

valeurs en mètres	VIVE		MORTE	
	Pleine mer	Basse mer	Pleine mer	Basse mer
Borj Jilij (N-O)	2,1	0,4	1,4	1,0
Houmt Essouk	1,4	0,2	1,0	0,7
Ras Tourgeness	1,1	0,2	0,8	0,3

Le long de la côte nord-est de l'île, aussi bien de flot que de jusant, l'onde de marée entraîne l'apparition de courants associés de l'ordre de 20 à 50 cm/s au maximum.

Selon Molines (1992), par ailleurs, nous pouvons estimer l'amplitude de la marée dominante M2 (composante lunaire semi-diurne, de période 12h42mn) à 14 cm et la phase à 90° (figure 7). Le golfe de Gabès, siège d'une résonance de l'onde M2, les courants de marée peuvent y atteindre 30 cm.s<sup>-1</sup> près de la côte et environ 10 cm.s<sup>-1</sup> au large. Selon les résultats de Vincent (1992), l'hodographe associé à la marée M2 à proximité du site, est une ellipse dont le demi grand-axe, indiquant la direction principale du courant, à une orientation sud-est/nord-ouest

#### Vents et Houles

Les vents les plus forts (pouvant atteindre 25 Noeuds) soufflent du secteur W à NW. Cependant, les vents du secteur "Terre" (W) qui soufflent près de 20% du temps, n'engendrent pas de houles. Les vents de secteur NW à Nord soufflent, quand à eux, près de 35% du temps. L'agitation est essentiellement liée aux vents locaux dans le Golfe de Gabès, comme en témoignent la relation qui existent entre force du vent et hauteur de la houle d'une part et les directions d'autre part, mise en évidence par les roses de vents et de houles de la région (figure B).

A titre indicatif, nous reproduisons sur le tableau 1, les résultats de diverses études réalisées sur les courants dans les zones côtières par le BCEOM (1973) et rapportés par Andren et Hadj Ali Salem (1978). Bien que les auteurs n'en précisent pas les caractéristiques (durée d'enregistrement, pas d'échantillonnage, filtre, etc.), les valeurs du tableau 1 semblent être des mesures instantanées.

REGION	Direction à la marée montante	Direction à la marée descendante	Vitesse (cm.s <sup>-1</sup> )
En dehors de Tunis Nord	N-O	E. S-E	15-20
Baie de la Marsa	N-O	S-E	8-10
La Goulette	S	N	---
Hammam-Lif	Parallèle à la côte	Parallèle à la côte	20-40
Monastir - Sousse	Dépend uniquement de la direction du vent	Dépend uniquement de la direction du vent	25
Sousse (600-700 m de la côte)	N-O	S-E	10-25
Sfax (1 à 1,5 km de la côte)	Parallèle à la côte	Parallèle à la côte	30-50
En dehors de l'oued Agareb (1 à 2 km de la côte)	Parallèle à la côte	Parallèle à la côte	20
Gabès	N-O	N-N-E	9
Jerba	O	E	15-20
Zarzis	Direction du vent	Direction du vent	7

Tableau 1. Exemples de courants côtiers observés par BCEOM, 1973. D'après Andren et Hadj Ali, 1978.

#### IV. CONCLUSIONS

La frange côtière tunisienne est caractérisée par l'absence d'une circulation générale permanente et bien que le courant atlantique joue un rôle, certainement non négligeable, dans les échanges côtes-large, son influence le long des côtes tunisiennes - excepté les côtes nord- demeure faible comparé aux courants de marée ou à ceux induits par les vents. Ainsi les courants de marée sont les courants périodiques les plus significatifs et leur contribution dans le nettoyage des côtes et particulièrement des ports et des canaux est significative.

Les traits majeurs du mode de fonctionnement du bassin méditerranéen étant bien connu bien que certaines zones d'ombre subsistent, notamment dans sa partie sud. Cette image synthétique aiderait à appréhender les aspects bio-dynamiques le long des côtes tunisiennes à condition qu'un programme de surveillance soit mis en place sur une période suffisamment longue (une année au moins) et mettant en oeuvre les techniques adéquates.

## V. PERSPECTIVES

La stratégie d'actions la plus judicieuse doit se baser sur l'intercomplémentarité entre la modélisation et l'observation dans le but de répondre notamment aux questions ayant trait aux domaines d'aménagement du littoral et d'exploitation des ressources naturelles.

C'est généralement l'observation qui conduit à avancer des hypothèses que l'on cherche ensuite à tester par la modélisation. L'observation fournit aussi un ordre de grandeur des échelles spatio-temporelles, et celui-ci va conditionner la discrétisation du domaine à modéliser et le pas de temps à utiliser. L'observation précise également les conditions aux limites du modèle telles que les forçages hydrodynamiques, thermodynamiques ou dynamiques.

Nous proposons donc la mise en place d'un programme d'observations le long des côtes tunisiennes, mettant en oeuvre des marégraphes (4), des courantomètres (6 mouillages) ainsi qu'un suivi hydrologique périodique (5 radiales) et étalé sur au moins une année. L'acquisition de données météorologiques et satellitaires est également très souhaitable. Une reconnaissance bathymétrique le long des côtes tunisiennes (au moins sur une bande côtière de 5 milles de large) est fort utile et peut être menée avec le concours du service hydrographique et océanographique de la Marine Nationale.

## BIBLIOGRAPHIE

- Andren L.E et S. Hadj Ali**, (1978). Sources de pollution marine côtière en Tunisie: facteurs influençant sa distribution et ses effets. *Bul. INSTOP*. 1, 4, pp. 53-96.
- Azouz A.**, (1973). - Les fonds chalutables de la région nord de la Tunisie. 1: Cadre physique et biocoenoses benthiques, vol. 2, n°4.
- Benzohra M. and C. Millot** (1995). Characteristics and circulation of the surface and intermediate water masses off the Algerian coast. *Deep-Sea Research*, Vol. 42, No. 10, pp. 1803-1830.
- Bignami, F., G. Mattioli, A. Rotundi et E. Salusti** (1990a) - On a Sugimoto effect in the Mediterranean Sea: sinking and mixing of a bottom current in the Bari Canyon, southern Adriatic Sea. *Deep Sea Research*, Vol.37, N° 4, pp.657-665.
- Bignami, F., E. Salusti et S. Schiarini** (1990b) - Observations on a Bottom Vein of Dense Water in the Southern Adriatic and Ionian Seas. *J. Geophys. Research*, Vol. 95, N° C5, pp. 7249-7259.
- Bormans M., C. Garrett et K.R. Thompson**, (1987). Seasonal variability of the surface inflow through the Strait of Gibraltar. *Oceanol. Acta*, 9, 403-414.
- Darmoul, B.** (1988) - Pollution dans le Golfe de Gabès (Tunisie): bilan des six années de surveillance (1976-1981). *Bull. Inst. Nation. Sci. Tech. Océanogr. Pêche Salammbô*, 15: 61-84.
- Defant A.**, (1961). *Physical Oceanography*, vol II., Pergamon Press, 598pp.
- Font J., J. Salat et J. Tintore**, (1988). Permanent features in the circulation of the Catalan Sea. *Oceanologica Acta*, Special Issue N° 9, 51-59.
- Guibout P.**, (1987). *Atlas hydrologique de la Méditerranée*, Lab. d'Océanographie Physique du Museum, Paris, 174pp.
- Ktari-Chakroun F. et Azouz A.** (1971). - Les fonds chalutables de la région sud-est de la Tunisie (golfe de Gabès). *Bull. Inst. Océanogr. Pêche, Salammbô*, vol. 2, n°1 : 5-47.

- Hamza, A. et N. Ben Maïz**, (1990) - Sur l'apparition du phénomène "d'eau rouge" dans le Golfe de Gabès (Tunisie) en été 1988. Bull. Inst. Nation. Sci. Tech. Océanogr. Pêche Salammbô, 17: 5-16.
- Garzoli S. and C. Maillard**, (1979). Winter circulation in the Sicily and Sardinia straits region, Deep-Sea Research, 26 A, 933-954.
- Garzoli S., V. Parisi and E. Paschini**, (1981). On the effect of bottom topography on two eddies in the Sardinia and Sicily Straits region, Deep-Sea Research, 29, 77-86.
- Hamza A. et N. Ben Maïz**, (1990). - Sur l'apparition du phénomène "d'eau rouge" dans le Golfe de Gabès en Eté 1988 - Vol. 17, pp.5-16.
- Ktari-Chakroun F. et Azouz A.**, (1971). - Les fonds chalutables de la région sud-est de la Tunisie (golfe de Gabès). Bull. Inst. Océanogr. Pêche, Salammbô, vol. 2, n°1 : 5-47.
- Lacombe H. et P. Tchernia**, (1972-b). Caractères hydrologiques et circulation des eaux en Méditerranée. In: The Mediterranean Sea, D. J. Stanley ed., Dowden Hutchinson and Ross, Strousberg, 25-36.
- Lubet P. et A. Azouz**, (1969). - Etude des fonds chalutables du golfe de Tunis. Bull. Inst. Océanogr. Pêche, Salammbô, t.1, n°3 : 87-111.
- Manzella G.M.R., Gasparini G.P. et M. Astraldi**, (1988). Water exchange between Eastern and Western Mediterranean through the Strait of Sicily. Deep Sea Res. Vol 35, N° 6, pp. 1021-1035.
- Miller, A. R., and Stanley, D.J.** (1965). Volumetric T/S diagrams for the Mediterranean Sea. Rapp. et P.V. CIESM XVII, 755-759.
- Millot C.**, (1985). Some features of the Algerian Current. J. Geophys. Res., 90, C4, pp. 7169-7176.
- Millot C.**, (1987a). Circulation in the western Mediterranean Sea. Oceanologica Acta., 10 (2), 143-149.
- Millot C.**, (1987b). The circulation of the levantine water in the Algerian Basin. J. Geophys. Res., 92, (C8), 8265-8276.
- Molines J. M.**, (1991). Modelling the barotropic tides in the strait of Sicily and tunisian shelf. Oceanol. Acta, 14, 3, pp. 241-252.

- Ovchinnikov I.**, (1966). Circulation in the surface and intermediate layers of the Mediterranean. *Okeanologiya*, 6, n°1, 48-59.
- Pedlosky J.**, (1986). *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer-Verlag, Second Edition, pp. 710.
- Poizat C.**, (1970). Hydrodynamique et sédimentation dans le Golfe de Gabès. *Téthys*, t. 2, n°1 : 267-296.
- Seurat, L.G.**, (1924) - Observations sur les limites, les faciès et es associations de l'étage intercotidal de la petite Syrte (Golfe de Gabès) *Bull. Sta. Océanogr. Salammbô*, n°3 : 72p.
- Seurat, L.G.**, (1929a) - La petite pintadine du Golfe de Gabès. *Bul. Sta. Aqua. Pêche Castiglione*, N°1 : 9-28.
- Seurat, L.G.**, (1929b) - Observations nouvelles sur les faciès et les associations animales de l'étage intercotidal de la petite Syrte. *Bull. Sta. Océanogra. Salammbô*, N°12 : 59 p.
- Seurat, L.G.**, (1934) - Formations littorales et estuaires de la Syrte mineure (Golfe de Gabès). *Bull. Sta. Océanogra. Salammbô*, N° 32 : 65 p.
- Taupier-Letage I., et C. Millot**, (1987). Some particular aspects of the circulation in the Algerian Basin. *Oceanol. Acta*, Special Issue, 9, pp. 79-87.
- Vincent P.**, (1992). Barotropic tide in the Mediterranean Sea from a finite element numerical model. *J. Geophys. Res.*
- Wüst G.**, (1961). On the vertical circulation of the Mediterranean Sea. *J. Geophys. Res.*, 66, pp 3261-3271.