

ÉTUDE DE LA CIRCULATION DES MASSES D'EAU DANS LE GOLFE DE MARSEILLE (*)

Christian CASTELBON

Laboratoire d'hydrobiologie marine. Centre universitaire de Luminy
13009 Marseille, France

SUMMARY

The water current study of the Marseille gulf has required, in a first time, the realization of an original device for setting up the current meters at fixed station. This automatic apparatus allows to obtain, in a relatively short time, a satisfying number of data in the whole volume of this coastal basin. This working method has allowed me to describe the main patterns of sea water circulation in the gulf and in close connection with the predominant winds of the area. The larger part of the results, thus obtained, confirm several observations of hydrological, sedimentological and biological phenomena.

RESUME

L'étude courantologique de toute la couche d'eau du golfe de Marseille, au moyen de courantomètres enregistreurs, a nécessité, tout d'abord, la réalisation d'un dispositif original de mise en œuvre des instruments de mesure au point fixe. Cet appareillage, entièrement autonome, permet d'effectuer un échantillonnage satisfaisant de mesures dans l'ensemble du volume d'eau de ce bassin côtier, avec cependant, un nombre restreint d'enregistreurs.

Cette méthode de travail m'a permis de décrire les principaux types de régimes courantologiques se manifestant dans le secteur étudié, en étroite relation avec les situations météorologiques prédominantes de la région. Les résultats ainsi obtenus corroborent et vérifient de nombreuses observations de phénomènes d'ordre hydrologique, sédimentologique et biologique.

INTRODUCTION

La circulation des masses d'eau océanique revêt une importance dont la preuve n'est plus à faire dans de multiples phénomènes physiques terrestres ou encore dans quelques secteurs de l'économie et des activités humaines. Ainsi, au sein de l'hydrosphère, en particulier, les courants marins représentent en définitive un facteur prépondérant de l'installation, des fluctuations et de l'équilibre du monde vivant de cet immense milieu.

Jusqu'à présent, les océanographes dynamiciens se sont essentiellement attachés à résoudre les problèmes posés par les grands bassins océaniques ou maritimes, délaissant quelque peu les bordures littorales dont la complexité de détail, ne présente en général que très peu d'intérêt pour la compréhension des mécanismes courantologiques d'ensemble. Par contre, l'étude biologique du domaine marin a eu nettement tendance à être entreprise à partir de la côte, en s'accommodant fréquemment, de moyens d'investigation relativement modestes.

(*) Thèse présentée le 5 novembre 1971, pour l'obtention du grade de Docteur en Océanographie.

C'est pour cette raison que nos connaissances d'ordre biologique de la zone côtière ou du plateau-continental ont plus rapidement progressé et permis de dégager des notions synthétiques de distribution des espèces animales et végétales de ce domaine. C'est ainsi que le golfe de Marseille a fait l'objet de très nombreux travaux de la part des chercheurs de la Station marine d'Endoume et qu'à l'issue de certaines de ces études, quelques idées et hypothèses ont été avancées sur le mode de circulation des eaux de ce bassin côtier. Cependant, les hypothèses émises à ce sujet reposaient, en grande partie, sur des observations indirectes ou purement qualitatives. Aussi, est-il devenu nécessaire de réaliser une étude courantologique un peu plus fine de ce secteur, dans le but de vérifier les conceptions précédemment formulées ou pour apporter de nouvelles bases aux recherches que mèneront dans le golfe, des biologistes ou des géologues. En outre, d'un point de vue plus pratique, la connaissance des modalités courantologiques est de toute évidence indispensable à la réalisation de travaux d'aménagement et de protection de ce site naturel, de plus en plus menacé par l'extension des activités humaines concentrées dans la région environnante.

1 - LE GOLFE DE MARSEILLE

Avant d'aborder l'étude de la circulation dans le golfe de Marseille, il est peut-être nécessaire de rappeler très brièvement le contexte géographique ou topographique du secteur étudié ainsi que les régimes de vents locaux influençant largement le transport des masses d'eau.

1.1. - Situation géographique et topographique (fig. 1)

Pratiquement situé à la jonction des côtes basses du Languedoc et du littoral provençal plus tourmenté, le golfe de Marseille est constitué par une dépression de la ligne de rivage profonde d'une quinzaine de kilomètres suivant la direction nord-sud. De part et d'autre du golfe de Marseille, les profils bathymétriques présentent des aspects quasiment opposés. Ainsi, le plateau-continental, souligné par le tracé de l'isobathe - 200 mètres, est très réduit voire inexistant à l'est de la zone considérée alors qu'il prend des proportions importantes à l'ouest, vers le golfe du Lion. Adossé au nord et au sud-est contre les dernières rides calcaires des préalpes provençales, le golfe de Marseille est largement ouvert sur la mer dans les secteurs sud à ouest. On peut, cependant, limiter ce bassin vers le large, par une ligne joignant le cap Méjean aux îlots du cap Croisette. La côte orientale du golfe, comprise entre la chaîne de l'Estaque (ou de la Nerthe) et le massif de Marseilleveyre, est un étroit replat plus ou moins accidenté et fermé dans l'arrière pays par une série de chaînes de collines délimitant l'agglomération marseillaise.

Dans le cadre de ces limites, le golfe est naturellement divisé en deux bassins d'inégale importance par l'archipel du Frioul situé dans le prolongement de la colline de N.D. de la Garde. Ces deux bassins communiquent entre eux par un seuil étroit où la profondeur excède à peine 20 mètres entre la pointe d'Endoume et l'îlot d'If.

Au nord du golfe, s'étale la rade de Marseille, vaste bassin de 65 km² et de 52 mètres de profondeur moyenne. Cette rade est bordée par les pentes relativement abruptes de la chaîne de l'Estaque, au nord et celles de l'archipel du Frioul, au sud. C'est au fond de ce bassin que sont édifiés les aménagements portuaires qui masquent actuellement le rivage naturel. Dans l'axe de la rade, la pente du fond, d'abord assez marquée (de l'ordre de 2,5 %), s'atténue rapidement à mesure que l'on s'éloigne de la côte. Ainsi l'isobathe - 70 mètres qui pénètre assez profondément dans ce bassin, délimite un large plateau envasé où les sondes ne dépassent jamais 80 mètres.

Par contre, au sud de l'archipel du Frioul, dans le prolongement de la vallée de l'Huveaune, entre les massifs de Marseilleveyre et de N.D. de la Garde, le deuxième plan d'eau n'occupe qu'une superficie de 35 km² avec une profondeur moyenne avoisinant 30 mètres. La ligne de plus grande pente de ce bassin, orientée ENE-WSW, est remarquablement régulière et faible (variant de 0,6 % à 1 %) jusque sur les fonds de 90 mètres et plus, bien au-delà du golfe proprement dit dont la limite vers le large coïncide ici à peu près avec le tracé de l'isobathe - 50 mètres.

Je dois cependant, signaler que chaque fois que les conditions de travail l'on permis, j'ai effectué des mesures dans un secteur englobant l'îlot de Planier. Cet élargissement du cadre de travail, fréquemment

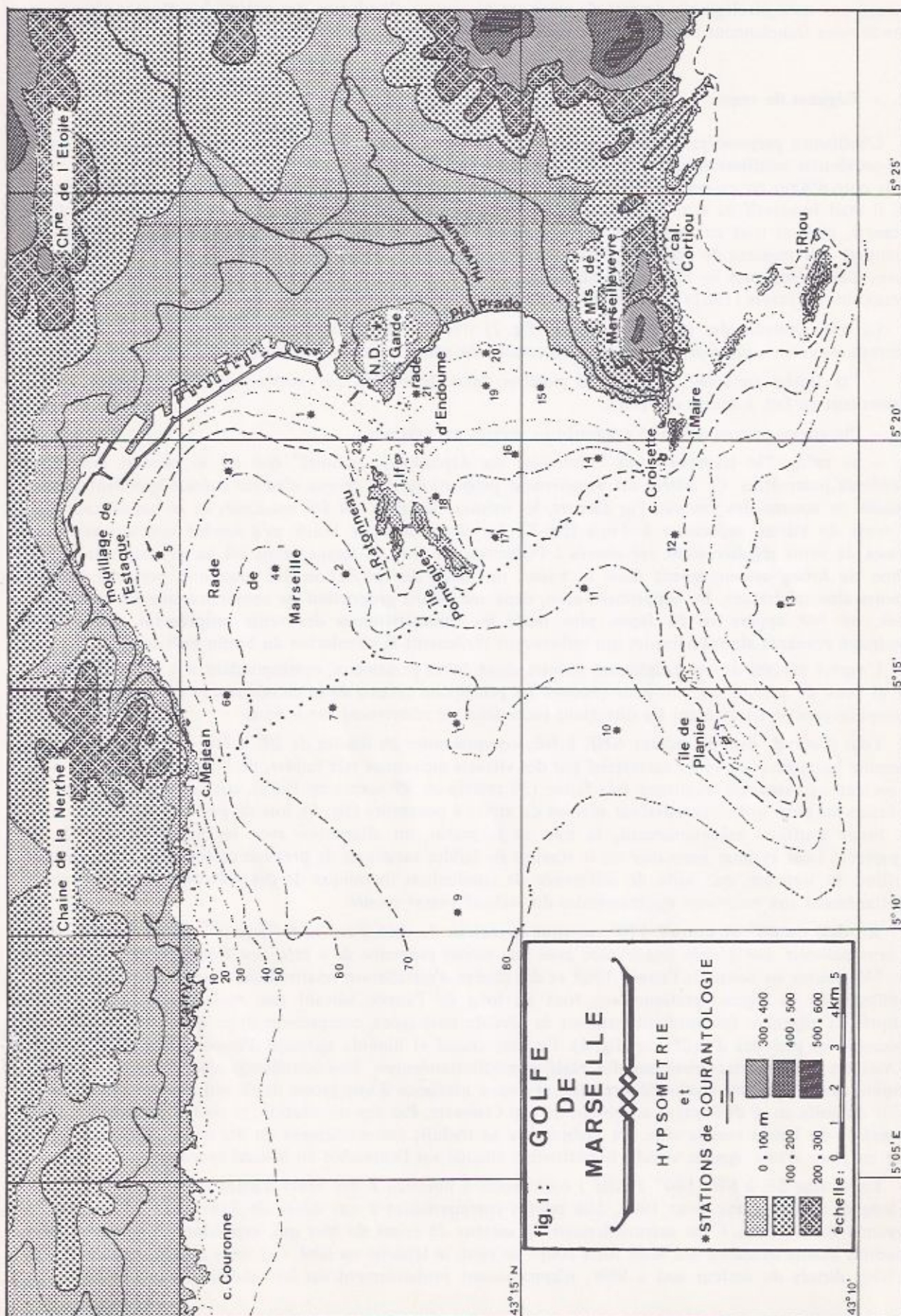


Figure 1 — Golfe de Marseille.

envisagé par les hydrologistes, permet de saisir un peu mieux l'évolution des paramètres physico-chimiques entre la zone franchement littorale et le domaine de transition vers le large.

1.2. — Régimes de vents

L'influence prépondérante des courants atmosphériques sur la circulation des eaux littorales du bassin nord-occidental méditerranéen, a déjà été soulignée par Romanovsky (1952, 1955 b) et Hentsch (1962) sur la côte d'Azur ou encore par Duboul-Razavet (1958) et Blanc (1969) dans la région de Marseille. De ce fait, il était impératif de tenir compte des divers régimes de vents locaux et d'en entreprendre une étude succincte, portant tout au moins sur le cycle annuel de 1969, période pendant laquelle ont été effectuées la plupart des mesures de courant faisant l'objet de ce travail. La présente étude de vents repose sur les relevés météorologiques de l'Observatoire de Marseille et rappelle de toute évidence quant aux résultats, les travaux de A. Travers (1961) et de Travers (1971).

La rose annuelle des vents à Marseille (fig. 2) tracée à partir de 8 relevés quotidiens de vitesse et direction moyennes, comporte dans les 18 directions du cercle azimutal (secteurs de 20°) :

- "la durée annuelle" déduite du nombre total de relevés par secteur de 20° ; chaque relevé représentant en fait 3 heures de temps.

- "la vitesse moyenne" (V_m) exprimée en mètres par seconde.

- et enfin, "le transport" ou "l'intensité du déplacement annuel" qui est le produit des deux précédents paramètres. Ce critère est directement proportionnel à ce que d'autres auteurs appellent vitesse annuelle ou somme des vitesses. Par ailleurs, les mêmes éléments ont été recalculés en ne considérant que les vents de vitesse supérieure à 3 m/s (fig. 3). Le choix de cette limite m'a semblé correspondre aux vitesses de vents régulièrement enregistrés à l'Observatoire lors de temps calme où ne se manifeste qu'un régime de brises accompagnant dans le bassin un mode de circulation des eaux non perturbé par les facteurs atmosphériques. En supprimant ainsi, dans une bonne proportion les nombreux enregistrements de brises, on fait apparaître de façon plus nette les caractéristiques des vents proprement dits ou les principaux courants atmosphériques qui influencent réellement la circulation du bassin envisagé.

L'aspect général de ces graphiques montre deux lobes principaux, correspondant aux vents de secteur NW et ceux de secteur est. On peut résumer les principales propriétés et conséquences des divers courants atmosphériques en considérant les directions successives de relèvement sur la rose.

Tout d'abord, dans le secteur NNE à NE, compris entre les limites de 20° à 60° apparaît un premier ensemble homogène de vents caractérisé par des vitesses moyennes très faibles, de l'ordre de 1,9 à 2,6 m/s. Ce secteur de vents, de fréquence très faible (33 relevés ou 99 heures en 1969), comprend essentiellement les brises de terre qui se manifestent surtout de juillet à novembre (fig. 4), lors de périodes de beau temps. Ces brises soufflent essentiellement, la nuit et le matin, en alternance avec les brises de mer de la mi-journée. Leur rythme journalier est le résultat de faibles variations de pression créées entre les domaines maritime et terrestre, par suite de différence de conduction thermique de ces milieux respectifs, soumis simultanément aux variations nyctémérales du réchauffement solaire.

Au delà de 60° et jusqu'à 120° , se situe le secteur du vent d'est ou le "levant". Localement, ce type de vent présente une grande importance avec une vitesse moyenne de 6 m/s, une fréquence de 315 relevés soit 945 heures au cours de l'année 1969 et des durées d'installation relativement longues. Le vent d'est se manifeste sur la région, pratiquement tout au long de l'année suivant une variation saisonnière bien marquée et régulière (notamment pendant la période envisagée), comprenant deux maxima d'importance avoisinant les périodes d'équinoxe (fig. 4). Ce vent chaud et humide entraîne d'importantes nébulosités et les violents orages caractéristiques des régions méditerranéennes. Son installation s'accompagne de fortes tempêtes dans le bassin nord-méditerranéen et donne naissance à une grosse houle qui pénètre dans la zone d'abri du golfe en se diffractant au niveau du cap Croisette. Par son orientation, le vent d'est entraîne l'eau de surface du bassin vers la côte. Ce phénomène se traduit, essentiellement en été et en automne, par la mise en place d'une épaisse couche homotherme chaude sur l'ensemble du littoral provençal.

Le secteur SE à SW (140° à 220°) correspond à nouveau à des vents d'assez faible importance tout au long de l'année (avec pour 1969, 106 relevés correspondant à une durée de 318 heures et une vitesse moyenne de 2,8 m/s). C'est essentiellement un secteur de brises de mer qui, cependant, à quelques rares occasions donne naissance à d'assez forts coups de vent, le lèbèche ou labé. Ces rares et peu durables coups de labé, dirigés de secteur sud à SSW, n'apparaissent probablement sur les schémas récapitulatifs, qu'au

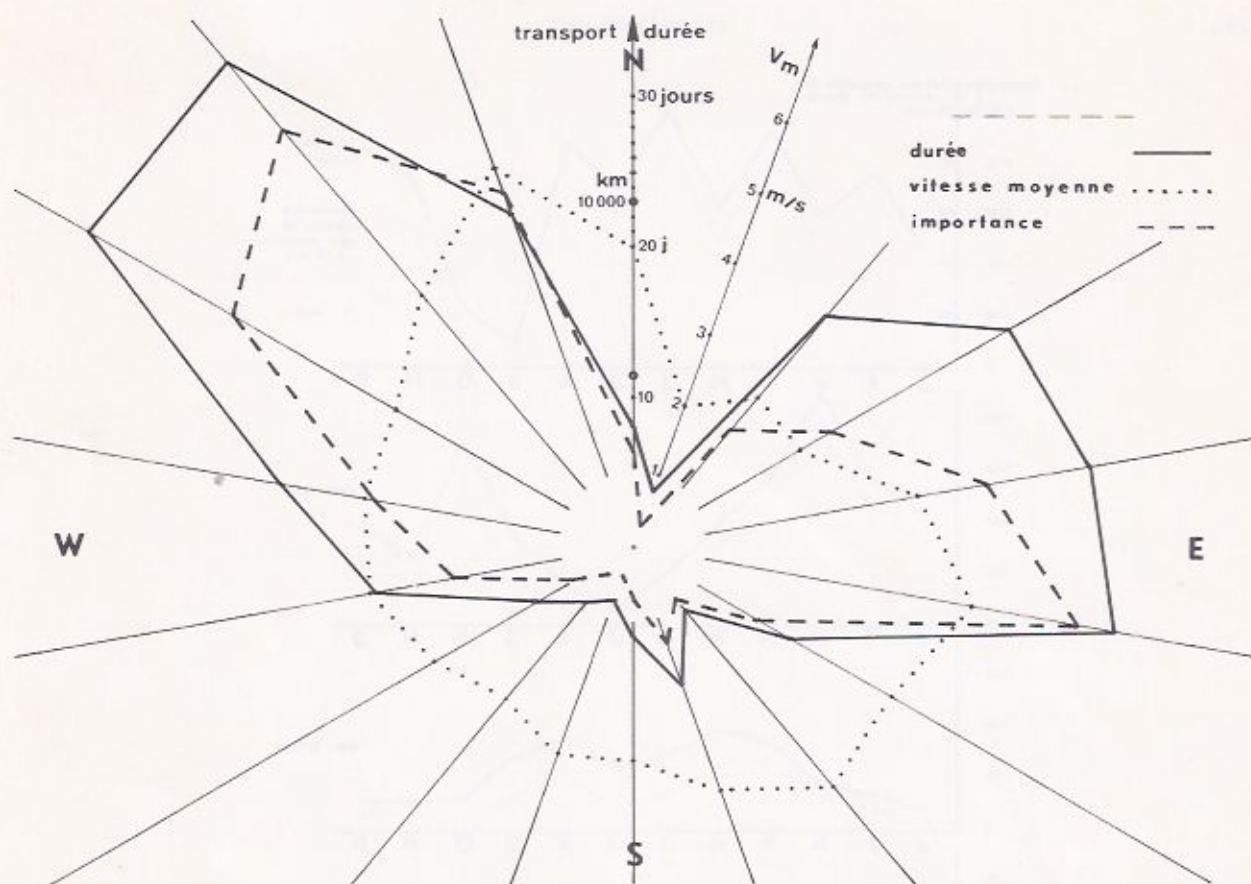


Figure 2 - Les vents à Marseille au cours de l'année 1969.

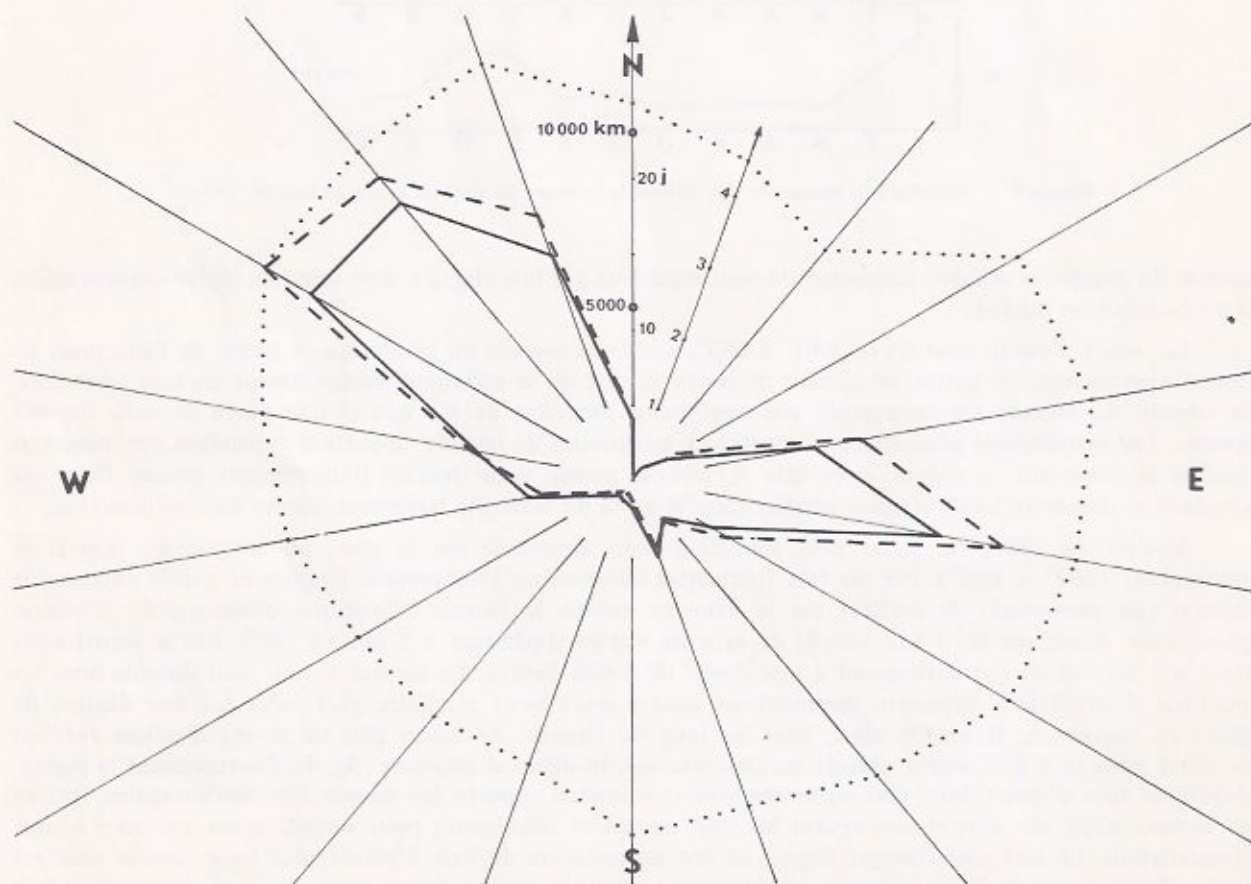


Figure 3 - Rose annuelle des vents de vitesse supérieure à 3 m/s.

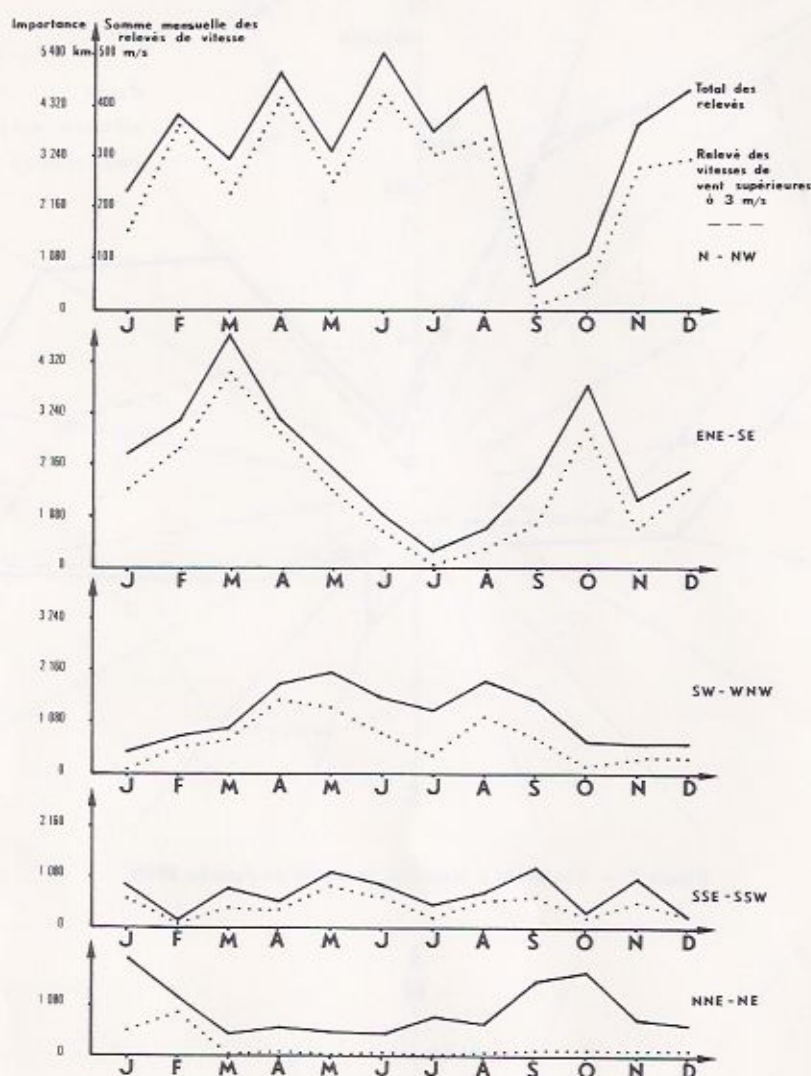


Figure 4 — Distribution mensuelle des différents secteurs de vent au cours de l'année 1969.

niveau du tracé des vitesses moyennes de vent supérieur à 3 m/s (fig. 3), avec une très légère augmentation dans la direction du sud.

Les vents d'ouest, orientés de 240° à 280° , soufflent surtout du printemps au début de l'automne. Ils constituent encore, en partie, un secteur de brises de mer où se surimpose fréquemment un vent assez fort, la largade. La largade est caractérisée par une vitesse moyenne de 4,8 m/s et une durée annuelle de 483 heures. Les installations généralement courtes et transitoires de largade, apportent cependant des nuages et parfois la pluie sur la région alors que la mer se creuse pour devenir fréquemment grosse. Dans ces conditions, une forte houle d'ouest pénètre dans le golfe de Marseille largement ouvert dans sa direction.

Au-delà de 280° , on passe sans transition bien apparente sur la rose, au secteur du mistral et tramontane (300° à 360°). Par ses très fréquentes installations relativement longues et par sa violence, le mistral (du provençal: le maître) est le vent ou même le facteur climatique dominant de la région provençale. Ainsi, sur les 1 155 relevés de vent de vitesse supérieure à 3 m/s en 1969, 540 se répartissent dans son secteur ce qui correspond à une durée de 1 620 heures. Le mistral est un vent durable dont les périodes d'installation dépassent couramment quatre jours pour atteindre plus rarement une dizaine de jours au maximum. Il souffle ainsi, tout au long de l'année, de façon plus ou moins régulière avec un profond minimum à la saison chaude ou plus souvent en début d'automne (fig. 4). En traversant la région, depuis les aires d'anticyclone plus septentrionales, le mistral apporte des masses d'air continentales, froides et sèches. Ainsi, ce vent chasse devant lui tout nuages et nébulosités pour donner après quelques heures d'installation, un ciel parfaitement dégagé et une température de l'air d'autant plus basse que le vent est plus orienté au nord. Dans le bassin nord-méditerranéen, le mistral donne naissance à de fortes tempêtes

alors que dans le golfe de Marseille, en dehors de minces zones d'abri, apparaissent des trains de vagues très serrés battant violemment les rivages exposés. Parallèlement, on note une baisse très sensible de la température de l'eau, due en partie par l'échange thermique mer-atmosphère mais surtout à la remontée d'eau plus profonde qui compense le départ de la couche d'eau superficielle chassée vers le large par le vent.

Pour conclure cette étude du principal facteur climatique influençant directement la circulation des eaux dans le bassin côtier de Marseille, on peut établir un classement des vents locaux par ordre d'importance, comme suit :

- 1/ Les vents de secteur NW à N.
- 2/ Les vents de secteur ENE à ESE.
- 3/ Les vents de secteur WSW à WNW.
- 4/ Les vents de secteur SW à SE.
- 5/ Les vents de secteur NNE à NE.

2 – METHODE ET MATERIEL UTILISES DANS L'ETUDE DE LA CIRCULATION DANS LE GOLFE DE MARSEILLE

La circulation des masses d'eau dans une zone littorale relativement fermée et peu profonde, comme le golfe de Marseille, présente une assez grande variabilité de régimes courantologiques dont la mise en place semble dépendre étroitement des vicissitudes des conditions météorologiques ambiantes. De ce fait, l'étude de ce type de circulation nécessite l'obtention d'une rapide vue d'ensemble du phénomène, pour chaque régime de temps. Avec le matériel de mesure ou d'observation actuellement utilisable, il est toujours très difficile d'obtenir une réelle vue d'ensemble du régime courantologique existant à un moment déterminé dans un bassin de dimensions même modestes, tel que le golfe qui nous intéresse. Les rares travaux réalisés dans ce domaine (Romanovsky, 1952, 1955 a ; Hentsch, 1962) sont basés sur l'emploi simultané de différents systèmes de mesure tendant à se compléter mutuellement. Ainsi, très souvent, l'observation de flotteurs dérivants avec la couche d'eau superficielle est accompagnée de mesures au courantomètre, à différentes profondeurs de quelques stations fixes du bassin.

En disposant, pour l'étude entreprise dans le golfe de Marseille, de deux courantomètres enregistreurs, j'ai, après différents essais plus ou moins fructueux de mise en œuvre à point fixe, choisi une méthode de travail qui rappelle le maniement du moulinet Ekman. La méthode consiste à déplacer verticalement et horizontalement, un nombre restreint d'appareils de mesure, un grand nombre de fois, dans un laps de temps suffisamment court pour pouvoir considérer les résultats obtenus comme pratiquement simultanés. Pour ce faire, on peut évidemment fixer le courantomètre sur le câble du treuil du navire, ancré sur le point de mesure. Mais les médiocres qualités du point fixe ainsi réalisé, les difficultés d'ancrage que rencontrent les navires et la perte de temps qu'entraîne cette manœuvre, m'ont conduit à imaginer un dispositif de mouillage au point fixe, facile à installer et à récupérer, réalisant, en outre, automatiquement l'immersion progressive et intermittente des courantographes. Ce dispositif de surface ou "bouée à treuil" (fig. 5), équipant chaque enregistreur, constitue un ensemble autonome permettant une mise en œuvre partiellement simultanée des deux courantographes. Ce procédé améliore considérablement le rendement de ce modeste appareillage, ne serait-ce qu'en éliminant les interruptions complètes de mesures pendant les déplacements du navire d'une station à l'autre.

2.1. – Description de l'appareillage

La bouée à treuil

2.1.1.1. – Le radeau

L'élément flottant est constitué d'une plateforme s'appuyant sur deux flotteurs (fig. 5 ; FL), de mousse de polyuréthane, de 110 dm³ chacun, réalisant à eux deux un polygone de sustentation rectangulaire de 1,50 m de long sur 1,10 m de large. Ce radeau possède ainsi une flottabilité positive de l'ordre de 200 kg, ce qui lui permet d'une part, de maintenir aisément l'appareil de mesure immergé et d'autre part, de supporter hors de l'eau un petit treuil dont le poids

total n'excède pas 20 kg. Ce dispositif est maintenu en station par un simple ancrage, au moyen d'un filin de nylon terminé d'un petit grappin (fig. 5 ; ac).

2.1.1.2. — Le treuil

Fixé sur la plateforme, le treuil débite à travers le centre de celle-ci, le câble suspenseur de l'appareil de mesure. Le bâti du treuil a été réalisé en cornière de fer, protégée de la corrosion par une galvanisation à froid. Sa forme est celle à un prisme orthogonal tronqué à son sommet. Les deux faces trapézoïdales sont assemblées de façon rigide et définitive par des traverses soudées. Dans la partie supérieure du treuil est installé son tambour, garni d'une longueur de corde de nylon excédant quelque peu les plus importantes profondeurs du secteur étudié (dans le cas du golfe de Marseille j'ai adopté 100 m de câble de 8 mm de diamètre). Sur ce cordage sont fixées des "olives" ou cales de plomb (fig. 6 ; cp) dont l'espacement correspond aux immersions successives de fonctionnement de l'enregistreur (dans le cas présent tous les 10 m). Le tambour du treuil tourne librement sur son axe et se dévide sous le simple effet du poids du courantographe. Le filin ainsi débité est canalisé par un guide câble (fig. 5 ; gc) qui l'oblige à passer dans l'étroite gorge escamotable d'un système à fourchettes disposées en rayons autour d'un axe horizontal, constituant de la sorte une roue à six pales ou plus exactement une roue à six fourchettes (fig. 6 ; rF). Cette roue ne peut tourner que par à-coup de 60° réalisant ainsi une permutation circulaire des fourchettes. Chaque fourchette arrêtée en position horizontale s'oppose alors au passage des cales du filin, maintenant ainsi l'enregistreur à un niveau déterminé pendant le temps nécessaire à la mesure. Le poids du courantographe sur la fourchette en butée, entraîne la rotation de la roue à pales lors de son déblocage ; la cale peut alors glisser et le filin descendre jusqu'à l'arrivée du prochain plomb sur la fourchette suivante.

Pour réaliser ce déblocage, à intervalle de temps régulier, un mécanisme d'horlogerie (fig. 7 ; H) ferme le circuit d'alimentation d'un moteur électrique (fig. 7 ; M) qui anime un système à échappement. Ce moteur entraîne la rotation d'un excentrique (fig. 6 ; Ex.) qui provoque un mouvement pendulaire au niveau de l'ancre d'échappement (fig. 6 ; Ae). Le fonctionnement de cette dernière pièce permet la rotation d'une roue à rochets (fig. 6 ; R) solidaire de l'arbre à fourchettes. Chaque demi-oscillation de l'ancre d'échappement est suffisante pour libérer un rochet et permettre la rotation de 60° de la roue à fourchettes. Cette opération réalisée, la came (fig. 7 ; C₂) placée sur l'axe de l'excentrique de commande, coupe le circuit d'alimentation au niveau de l'interrupteur (fig. 7 ; I₁) qui lui est associé. Le dispositif reste en cette position pendant le temps nécessaire à la descente et à l'enregistrement de la mesure à cette immersion. Puis, le plateau à cames (fig. 7 ; C₂) du mécanisme d'horlogerie, sollicite à nouveau son interrupteur (fig. 7 ; I₁), à deux voies, installé dans un circuit monté en va-et-vient, afin d'opérer un nouveau changement de palier.

L'ensemble du matériel électrique et mécanique, assurant le fonctionnement automatique du treuil, est fixé sur le bâti de ce dernier et abrité de l'eau de mer par un boîtier (fig. 5 ; B) en matière plastique, d'étanchéité suffisante. Pour terminer la description de cet accessoire de travail, il faut signaler la présence de quelques éléments de détail visant à un meilleur fonctionnement de l'ensemble du dispositif ; ainsi le touret est muni d'un système simple de freinage sur l'axe de ses manivelles et en bout du filin porteur juste avant le point de fixation du courantographe, est installé un système amortisseur à sandows élastiques (fig. 5 ; am).

2.1.2. — Les courantographes

Les courantographes employés pour cette étude sont des modèles conçus et réalisés au Centre de Recherches et d'Etudes Océanographiques (le C.R.E.O.). Ces appareils enregistrent sur film photographique de 16 mm, la composante horizontale du courant en donnant comme paramètre le cap instantané et la vitesse moyenne. La vitesse du courant est déduite du nombre de tours d'un rotor de Savonius, effectués dans l'intervalle de temps séparant au moins deux prises de vues. Le principe d'enregistrement en est relativement simple et classique. Une caméra prend une succession de photographies de différents indicateurs à cadran (montre, compte-tours, compas et inclinomètre) installés côte à côte sur la platine de mesure de l'appareil. Compte tenu de la méthode d'utilisation que je me proposais d'adopter, il a fallu adjoindre au modèle d'origine, un manomètre indicateur de profondeur afin de connaître avec certitude, lors de la lecture des enregistrements, les niveaux où le courantographe a effectivement travaillé.

Suivant l'emploi fait de ces appareils, la cadence de mesure peut être réglée à une image par minute, par quart d'heure, par demi-heure ou par heure. Pour ces diverses cadences de prise de vue, l'autonomie de fonctionnement de l'enregistreur est respectivement de : 33 heures, 20 jours, 40 jours et 80.

Prêt à fonctionner, ce type de courantomètre pèse 30 kg dans l'air et environ 17 kg une fois immergé. Compte tenu de l'importance du poids de cet appareil destiné à être lâché en chute libre de dix mètres en dix mètres, j'ai installé au niveau du système amortisseur, une grappe de boules de verre (bv) allégeant l'instrument de mesure jusqu'à flottabilité positive. L'immersion du courantomètre est alors provoquée, avec une force moins importante, par un lest de plomb (fig. 5, p) accroché à la base de ce dernier. Plus loin, dans la discussion de la méthode, seront exposés les avantages que présente ce type d'installation.

2.2. — Mise en œuvre du dispositif

L'utilisation de cet appareillage consiste à placer chaque courantographe sous une bouée à treuil et à laisser ce dernier se dévider automatiquement en fonction des réglages choisis, pour obtenir à chaque niveau d'immersion une série de mesures. Ainsi, après avoir équipé les deux courantographes, à ma disposition, d'une bouée à treuil identique, le travail à la mer ne consiste plus qu'à ancrer sur la première

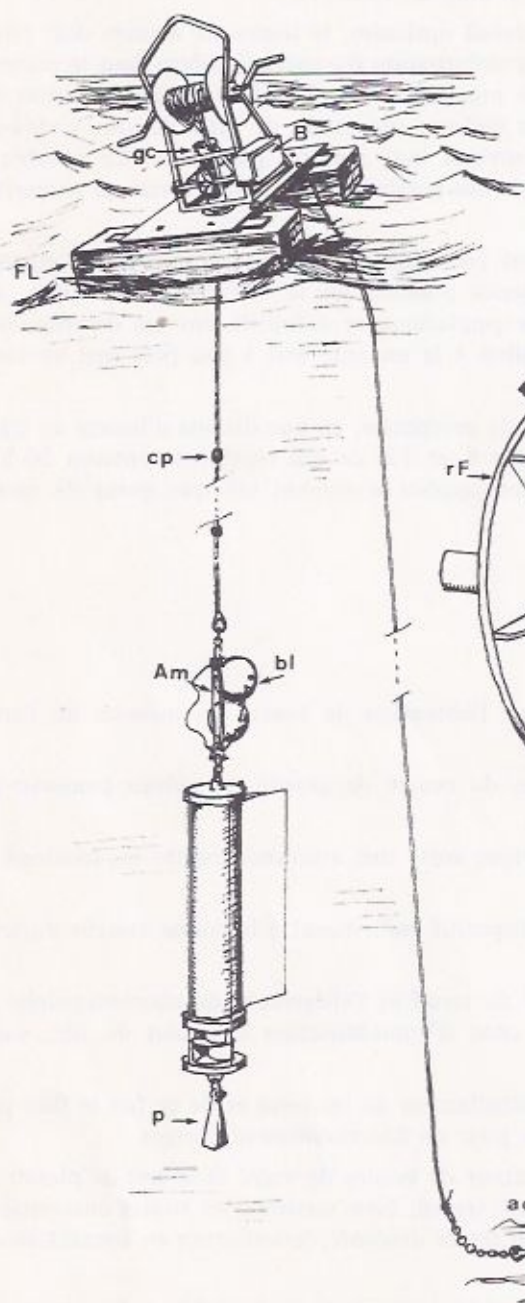


Figure 5 - Schéma d'installation.

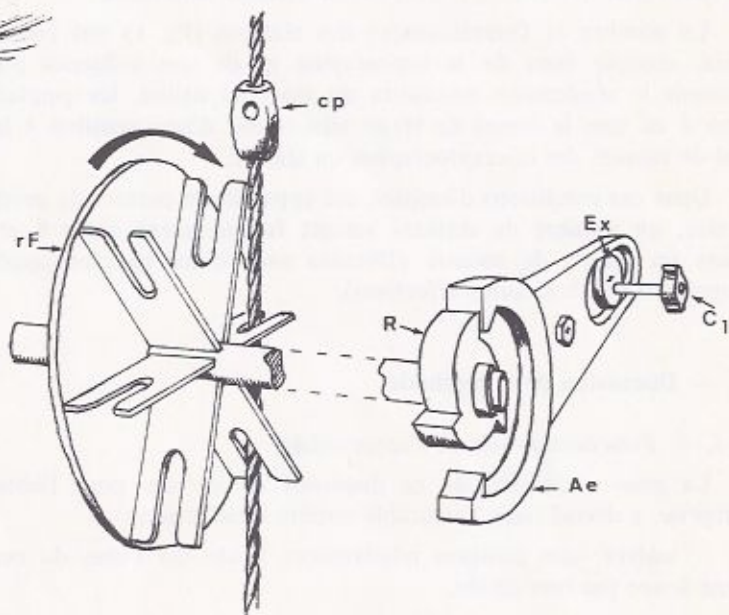


Figure 6 - Détail du mécanisme.

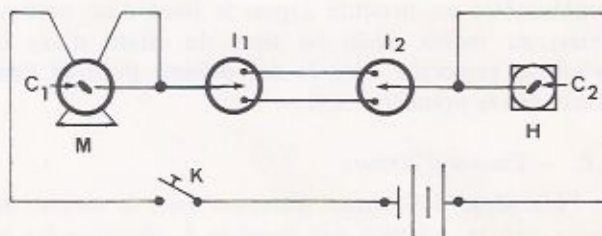


Figure 7 - Schéma du montage.

station, la bouée I, avec un enregistreur suspendu à deux mètres environ sous la surface, l'abandonner pour aller sur la deuxième station afin de réaliser la même manœuvre avec la bouée II puis revenir relever le premier appareillage pour le placer sur la troisième station et ainsi de suite . . .

Pour obtenir de cet appareillage un rendement de travail optimum, le temps de mesure doit être le plus court possible, compte tenu du temps nécessaire à la stabilisation du courantomètre dans le milieu et de sa cadence d'enregistrement. Ainsi, après divers essais préalables, j'ai estimé ce temps à environ huit minutes en faisant fonctionner les courantographes à leur cadence maximum de prise de vue, c'est-à-dire une mesure par minute. Par conséquent, on dispose d'environ huit mesures par palier. Ce nombre de mesure s'est avéré suffisant pour établir une valeur moyenne des paramètres enregistrés, tout en permettant de rejeter parfois certains relevés manifestement aberrants.

Le nombre et l'emplacement des stations (fig. 1) ont été choisis d'abord pour couvrir au mieux le bassin, compte tenu de la topographie et de son influence possible sur la circulation. En outre, afin d'obtenir le rendement maximum du matériel utilisé, les emplacements définitifs ont été déterminés de façon à ce que le temps de trajet aller-retour d'une position à la suivante soit à peu près égal au temps total de mesure des courantographes en station.

Dans ces conditions d'emploi, cet appareillage permet de prospecter, en une dizaine d'heures de travail en mer, un nombre de stations variant fréquemment entre 8 et 12, ce qui représente environ 50 à 70 paliers ou points de mesure effectués avec deux courantographes seulement (chaque point de mesure comportant 6 à 8 mesures effectives).

2.3. — Discussion de la méthode

2.3.1. — Fonctionnement de l'appareillage

La mise en œuvre de ce dispositif de surface pour l'obtention de toutes les mesures de l'étude entreprise, a donné dans l'ensemble entière satisfaction :

- malgré, une position relativement haute sur l'eau, du centre de gravité, le radeau conserve une bonne tenue par mer agitée.

- la simplicité mécanique du treuil présente en quelque sorte une assurance contre les incidents de fonctionnement de ce genre d'appareil à la mer.

Les différentes solutions adoptées sur l'ensemble du dispositif contribuent à la bonne marche du treuil et de l'enregistreur.

- a) Ainsi, l'amortisseur élastique, le frein du tambour de treuil et l'allègement du courantographe par la grappe de boules de verre concourent à adoucir le choc d'immobilisation des cales du filin sur le mécanisme du treuil.

- b) Le système de freinage empêche également tout emballement du tambour et de ce fait le filin reste toujours bien tendu, ce qui est une condition indispensable pour un fonctionnement correct. *

- c) Au-dessus et au-dessous du courantographe, le flotteur de boules de verre et le lest de plomb ont pour effet de maintenir l'appareil de mesure en position de travail, bien verticale, en toutes circonstances que ce soit pendant les mesures en pleine eau ou lorsqu'en fin de descente, le lest entre en contact avec le fond.

- d) Les mesures près de la surface sont également possibles, compte tenu du faible enfoncement des flotteurs du radeau (5 à 10 cm) ne perturbant que très superficiellement le milieu, alors que l'emploi de courantomètre en pendule depuis le bord d'un navire, exige une immersion au-dessous de la quille de ce dernier, au moins égale au tiers du tirant d'eau (Romanovsky, 1958). Cette marge de sécurité est amplement respectée dans le cas présent puisque l'enregistreur se trouve environ, à deux mètres sous la surface, dès la première mesure.

2.3.2. — Causes d'erreurs

"L'analyse des causes d'erreurs dans la mesure des courants au point fixe" de Romanovsky (1958), montre que la solution qui consiste à effectuer les mesures directement à partir d'un navire stoppé ou ancré est la plus critiquable. En effet, un navire ancré est toujours affecté par d'inévitables déplacements engendrés par le vent et les courants. Il est évident que de ce point de vue, la meilleure solution consisterait à n'utiliser aucun système de sustentation en surface. Sans atteindre la stabilité du dispositif d'installation à flotteur immergé, le système, présentement décrit, offre cependant des conditions de mise en œuvre

avec la fréquence d'oscillation de la ligne du courantomètre (la fréquence d'oscillation varie en fonction de la longueur du pendule réalisé). De cette combinaison de mouvements périodiques devrait alors apparaître une variation sinusoïdale des écarts de vitesse en fonction des profondeurs d'enregistrement. Par conséquent, pour mettre en évidence un tel mouvement, j'ai testé par la méthode statistique de l'analyse de variance, l'influence du facteur profondeur (ou longueur de pendule, variant de 0 à 80 mètres) sur les écarts de vitesse des mesures successives effectuées à chaque profondeur de travail. Cette analyse porte sur 10 séries d'enregistrement soit 486 mesures ; (tableau 1) réalisées dans des conditions assez différentes de position, de profondeur, d'état de la mer et de vitesse de courant.

1/ En restant ainsi, l'ensemble des 9 groupes de variables (réparties de 10 mètres en 10 mètres entre la surface et 80 mètres de profondeur maximum) on obtient un rapport F égal à 9,4, alors que la valeur seuil est de 4,9 avec un coefficient de sécurité de 99 %. Ce premier résultat permet de conclure qu'il existe une différence hautement significative des écarts de vitesse en fonction de la profondeur.

2/ Une conclusion analogue peut être tirée en comparant les données relatives aux mesures de surface à l'ensemble des écarts de vitesse observés à partir de 10 mètres jusqu'à 80 mètres de profondeur. ($F = 72,86$; valeur seuil de la table de Snédécour = 6,70 avec un coefficient de sécurité de 99 %).

3/ Par contre, en testant pareillement les huit groupes de variables établies à partir de 10 mètres jusqu'à 80 mètres de profondeur, on ne peut plus alors conclure à l'existence d'une différence significative entre les écarts de vitesse ($F = 0,69$; valeur seuil = 3,24 avec un coefficient de sécurité de 95 %).

En définitive, on peut donc déduire de ces tests que seule les mesures réalisées le plus près de la surface sont affectées de variations importantes et qu'au delà de ce niveau on ne peut plus dire qu'il existe une différence significative entre les variations de vitesse observées en pleine eau et celles obtenues, à coup sûr en absence de mouvement pendulaire, lorsque le lest de l'enregistreur repose sur le fond (séries de mesures à 80 mètres de profondeur).

Les résultats de l'analyse de variance montrent par conséquent qu'on ne peut affirmer avec un coefficient de sécurité suffisant, l'existence d'un mouvement pendulaire et que donc, rien ne s'oppose à ce que l'on puisse estimer que ce type de mouvement ne perturbe nullement la stabilité de l'appareil de mesure.

2.3.3. - Limitations d'emploi

2.3.3.1. - Etat de la mer

La mise en place et la récupération du matériel de mesure, nécessitant la présence d'un bateau, la méthode sera forcément limitée, de ce fait, par les plus ou moins grandes possibilités de travail à bord du bateau utilisé, en fonction de l'état de la mer. Il en résulte que je n'ai pas pu procéder à des mesures pendant les périodes de mauvais temps. Ceci est d'autant plus regrettable que ces périodes correspondent évidemment à des régimes de vents bien établis et par conséquent à des régimes de courants caractéristiques. J'ai, cependant, essayé de tourner cette difficulté en effectuant des mesures en début ou en fin d'installation d'un régime de vent donné, en comptant pour les mesures réalisées juste après ces périodes de mauvais temps, sur l'inertie des masses d'eau.

2.3.3.2. - Les marées

Il est évident que puisque cette méthode est basée sur des mesures non rigoureusement simultanées, il est indispensable que le régime courantologique de l'ensemble du bassin étudié, soit relativement stable pendant la durée totale des mesures. Cette condition impérative restreint l'utilisation de la méthode et du dispositif de mise en œuvre, à un bassin maritime très peu affecté par des courants de marée. Il était, par conséquent, nécessaire de vérifier l'influence des marées dans le golfe de Marseille.

Les enregistrements du marégraphe de Marseille montrent des variations semi-diurnes du niveau de la mer dont l'amplitude maximum est d'environ 30 cm. A ces variations périodiques, d'origine astronomiques, se superposent parfois des marées barométriques qui conjuguées avec les précédentes, peuvent entraîner des amplitudes de 50 à 60 cm. Ces fortes marées sont relativement rares et ne se manifestent que lors de passage de subites et profondes dépressions barométriques qui s'accompagnent de violentes tempêtes.

En ne considérant que les marées astronomiques d'amplitude maximum, on peut calculer de la même façon que Hentsch (1962) pour la baie de Villefranche, le courant de marée créé par exemple, au centre de la rade Nord du golfe de Marseille. On peut admettre que la vitesse du courant de marée est uniforme sur

toute la section s de la rade Nord, joignant la crique de Niolon à l'île de Ratonneau et passant par la station de mesure n° 4. Cette ligne délimite au nord-est de la rade, un bassin de superficie S .

Si dans l'intervalle de temps dt , il y a une variation dh du niveau de la mer, il y aura un volume d'eau $dv = S \cdot dh$ qui passera à travers la section s considérée. La vitesse v du courant traversant la section s admet pour valeur

$$v = \frac{1}{s} \cdot S \cdot \frac{dh}{dt}$$

Le niveau h est une fonction sinusoïdale du temps donc de la forme :

$$h = H \cdot \sin \omega t$$

H représente la hauteur maximum de la marée soit la demi amplitude maximum.

d'où
$$\frac{dh}{dt} = H \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

avec $\omega = \frac{2\pi}{T}$ la vitesse angulaire de la rotation de la terre et T la période de la marée.

donc
$$v = \frac{S}{s} \cdot H \cdot \frac{2\pi}{T} \cdot \cos \omega t$$

la vitesse de courant est maximum lorsque $\cos \omega t = 1$.

Dans le cas présent, les différents paramètres de l'expression de la vitesse ont les valeurs suivantes :

$$\begin{array}{ll} S = 3\,750 \cdot 10^8 \text{ cm}^2 & H = 15 \text{ cm} \\ s = 42 \cdot 10^8 \text{ cm}^2 & T = 12 \text{ h } 25 \text{ mn soit } 44\,700 \text{ s} \end{array}$$

d'où
$$V_{max} = 0,188 \text{ cm/s}$$

La vitesse maximum du courant de marée ainsi calculée donne une valeur voisine de 0,2 cm/s. Ce résultat, d'une part, est très faible par rapport aux vitesses régulièrement enregistrées en ce point et d'autre part, cette valeur bien inférieure au seuil de démarrage du rotor des courantomètres utilisés, correspond à peu de chose près à leur limite de précision.

Le caractère négligeable des courants de marée dans le golfe, rend donc la méthode décrite parfaitement utilisable dans ce secteur.

3 - RESULTATS DES MESURES DE COURANTS DANS LE GOLFE DE MARSEILLE

L'observation de l'ensemble des séries de mesures effectuées dans le bassin, montre deux types principaux de circulation, étroitement liés aux conditions atmosphériques régnant sur la région.

On distingue ainsi :

- en absence de vent, un régime de base induit par les courants de densité ou ce qu'il est convenu d'appeler, la circulation générale du bassin nord-occidental méditerranéen.

- et sous l'influence des vents locaux prédominants, une circulation des courants de dérive, présentant donc, autant de modalités que de régimes de vents portés sur la rose précédemment tracée. Ainsi la circulation des courants de vents comporte essentiellement :

- un régime de mistral.
- un régime de vent d'est.
- un régime de largade.

3.1. — Régime de base

Le régime de base se manifeste dans le golfe lors de situations météorologiques calmes et stables, caractérisées par de très faibles variations barométriques ce qui s'accompagne de périodes de très beau temps. Durant ces périodes, relativement longues en été et en automne, on note une alternance de brises de terre la nuit et de brises de mer le jour (vitesse : 2 à 3 m/s, de secteur NE de 0 h à 6 h et de secteur SW à W de 9 h à 18 h). Dans ces conditions, le régime de base est caractérisé par des vitesses de déplacement fréquemment élevées et par une assez grande stabilité de direction dans toute l'épaisseur de la couche d'eau. En absence de perturbation superficielle, d'origine atmosphérique, ce mode de circulation trouve son principe moteur dans le courant géostrophique qui balaie le littoral méditerranéen français d'est en ouest, pour constituer le courant liguro-provençal.

3.1.1. — Le courant général à l'extérieur du golfe

1/ A l'Est du golfe (fig. 8).

La présence de la dérive liguro-provençale a pu être retrouvée au voisinage du secteur étudié, lors d'une mesure réalisée par très beau temps, en début de saison chaude, entre l'île de Riou et le Bec de l'Aigle. Sur la côte des calanques, ce courant, circulant très tangentiellement au rivage, établit une veine d'afflux dans les 50 premiers mètres, compensée en profondeur par un retrait des eaux plus denses vers le canyon sous-marin de Cassidaigne.

Le rapprochement du profil thermique et de la distribution des vitesses de courants observés en cette station de mesures (fig. 9) explique assez clairement la situation hydrologique s'installant dans la région en début d'été (mesures effectuées au mois de juin 1969). Ainsi, la couche d'eau superficielle épaisse, dans ce cas de 35 à 40 mètres est le siège d'un réchauffement important au contact mer-atmosphère (la température de l'eau passe de 14,5°C à - 40 m pour atteindre 20,1°C en surface). C'est au sein de cette première couche que se manifeste la dérive liguro-provençale, longeant le littoral d'est en ouest, avec une trajectoire moyenne légèrement incidente à la côte. La vitesse de déplacement de cette nappe superficielle est relativement élevée et de l'ordre de 20 cm/s ou 0,4 nœuds à 20 mètres de profondeur, ce qui est tout à fait comparable aux résultats de mesures indirectes de Allain (1960) pour la zone considérée.

A partir de 40 mètres de profondeur, se situe une couche de transition large d'une trentaine de mètres également. Cette zone de friction et de mélange est le siège de vitesses très faibles, inférieures à 6 cm/s. Parallèlement, les relevés de direction montrent à ce niveau, le changement progressif et complet de l'orientation du courant. Dans cette couche de mélange, la température décroît faiblement mais de façon régulière en fonction de la profondeur.

Plus bas, dans les 15 derniers mètres, l'écoulement de compensation de l'apport d'eau superficiel, se dirige vers le large avec une vitesse accrue, de l'ordre de 10 cm/s à quelques mètres du fond. Cette couche profonde est également individualisée, en cette période de l'année, par l'existence d'une nappe d'eau homotherme froide.

— Validité et conséquences de cette mesure.

Cette zone littorale présente un intérêt très grand du point de vue des conséquences pratiques de sa circulation puisque deux importants émissaires de résidus domestiques et industriels s'y déversent. S'il est peut-être bien délicat d'affirmer quoi que ce soit avec une seule série de mesures effectuée dans ce secteur, on peut, cependant, constater de nombreux points d'accord entre ces mesures et diverses observations de phénomènes liés aux régimes de courants.

Ainsi, les paramètres courantologiques relevés près du fond sont confirmés par les observations directes de Laborel *et al.* (1961), effectuées à partir de la soucoupe plongeante dans les parages du canyon de Cassidaigne. Au cours de ces plongées, les observateurs ont pu voir l'installation du peuplement benthique constituant la biocénose du détritique du large. Cette portion du plateau-continental est, entre autre, caractérisée par des peuplements denses de crinoïdes : *Leptomitra phalangium*, observés ici en place, tous bras étallés en travers de la ligne de pente. Or, l'éthologie alimentaire de cette espèce, filtreuse de particules organiques en suspension dans l'eau de fond, nous apprend que l'animal réalise avec ses bras un appareil de capture qu'il dispose en travers du courant. En outre, ce comportement permet de déduire qu'une installation abondante de leptomètres ne peut avoir lieu que sur un substrat régulièrement balayé par un courant suffisamment fort pour apporter à ces filtres toute la nourriture nécessaire. Par

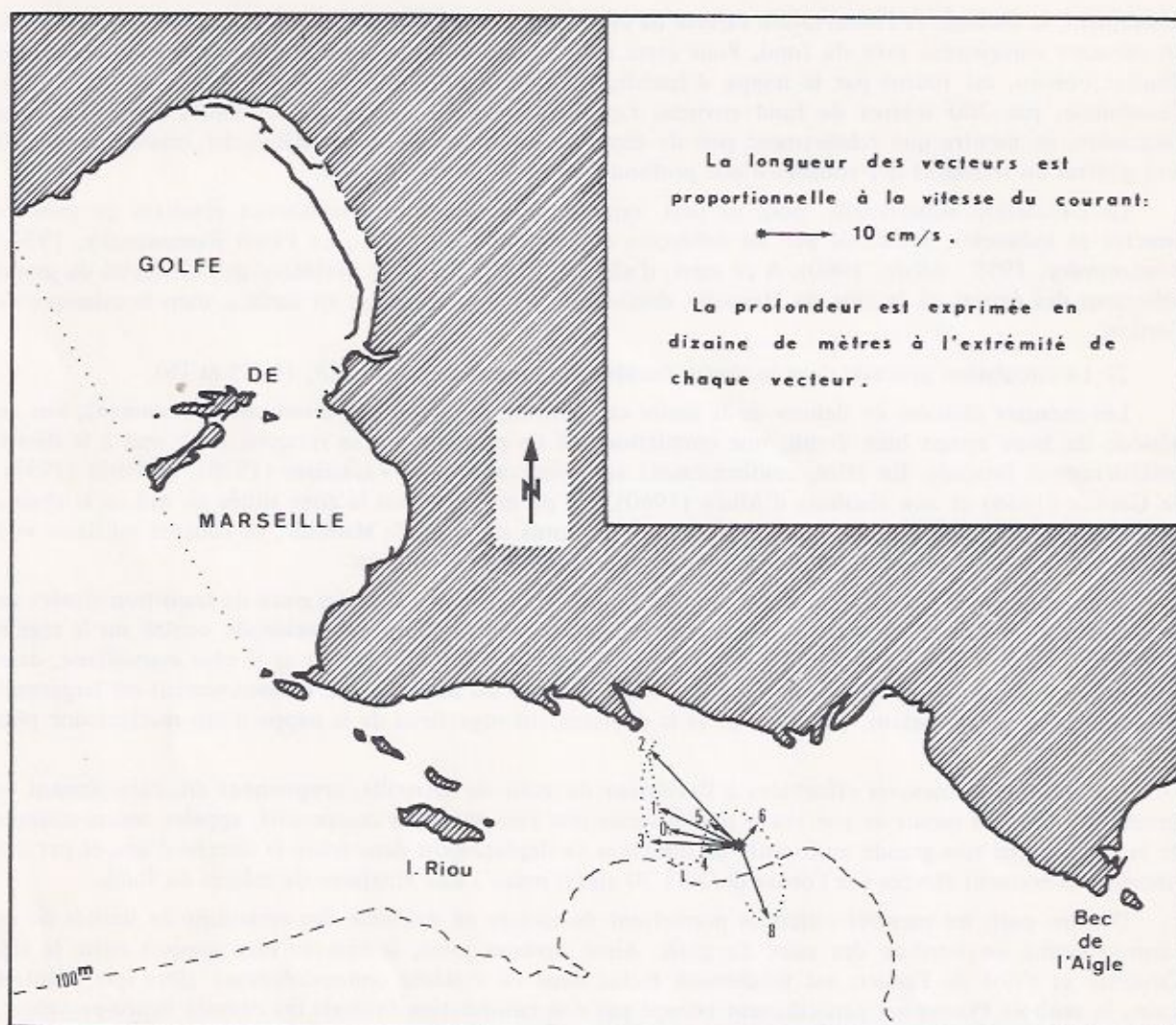


Figure 8 - Mesure de courant à l'est du golfe de Marseille, par temps calme.

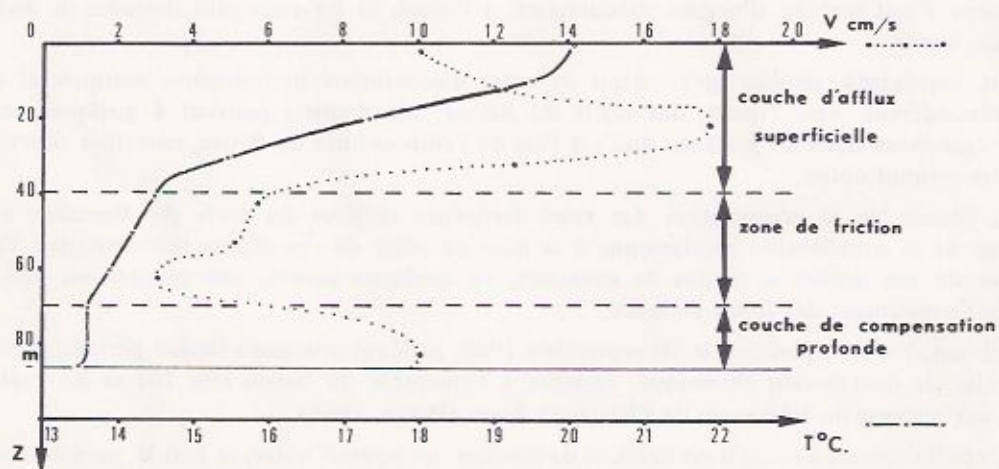


Figure 9 - Profil thermique et distribution des vitesses de courant à l'est du golfe de Marseille.

conséquent, la biologie et l'observation directe de cette espèce, indicatrice parfaite de courants, corroborent les mesures enregistrées près du fond. Pour cette même couche d'eau, un nouvel argument renforçant le résultat obtenu, est fourni par la nappe d'épandage des "boues rouges" rejetées en tête du canyon de Cassidaigne, par 300 mètres de fond environ. Les prélèvements de sédiment, effectués à proximité de l'émissaire, ne montre que relativement peu de dépôt de résidus en amont du débouché, conformément au sens général du transport des couches d'eau profondes, observé dans le secteur.

La circulation superficielle, pour sa part, rappelle parfaitement les nombreux résultats de mesures directes et indirectes, présentés par les différents auteurs (Nielsen, 1912 ; Le Floch Romanovsky, 1954 ; Romanovsky, 1955 ; Allain, 1960). A ce sujet, d'ailleurs, peut se poser le problème de l'efficacité du grand collecteur des égouts de la ville de Marseille, débouchant malheureusement en surface, dans la calanque de Cortiou.

2/ La circulation générale dans la région occidentale du golfe (voir fig. 13, 14, 15 et 16).

Les mesures réalisées en dehors de la limite cap Méjean, cap Croisette, montrent couramment, lors de période de beau temps bien établi, une circulation qui de prime abord se rattache assez mal à la dérive précédemment évoquée. En effet, conformément aux observations de Vayssières (1920), de Pérès (1933), de Gautier (1956) et aux résultats d'Allain (1960), j'ai pu mesurer dans la zone située au sud de la chaîne de l'Estaque, un courant dirigé d'ouest en est. Aux abords du golfe de Marseille, ce courant est dévié vers le sud et regagne le large en suivant approximativement la forme de la côte.

Les résultats des calculs dynamiques d'Allain montrent, en effet, dans les eaux de transition situées au niveau de 50 décibars, l'existence d'un assez grand mouvement d'allure anticyclonique, centré sur la région du Planier. Ce tourbillon intéresse les eaux comprises entre le delta du Rhône et la côte marseillaise, dans le sens ouest-est et des rivages de la Nerthe au 43° parallèle du nord au sud. Ce mouvement est largement influencé, d'après cet auteur, par l'arrivée et le déplacement superficiel de la nappe d'eau rhodanienne plus occidentale.

Les différentes mesures effectuées à l'extérieur du golfe de Marseille, proprement dit, caractérisent ce circuit (ou tout au moins sa portion la plus littorale que l'on peut, par commodité, appeler contre-courant de la Nerthe) par une grande uniformité de direction de déplacement dans toute la couche d'eau et par des vitesses relativement élevées (de l'ordre de 20 à 30 cm/s) jusqu'à une vingtaine de mètres du fond.

D'autre part, les mesures obtenues permettent de mettre en évidence des variations de limites de ce contre-courant, en bordure des eaux du golfe. Ainsi, certains jours, le bras de mer compris entre le cap Croisette et l'îlot de Planier, est totalement inclus dans ce système courantologique alors que d'autres jours, le seuil de Planier est partiellement occupé par une ramification littorale du courant liguro-provençal, inversement dirigée, qui pénètre dans le bassin méridional du golfe. Ces fluctuations de limites se retrouvent également en bordure de la rade Nord, en comparant les différents résultats.

— Conséquences

L'existence de ce mouvement anticyclonique, dont le contre-courant littoral aborde la côte aux environs du cap Couronne ou du golfe de Fos, est à l'origine de la mise en place d'une nette séparation entre la nappe d'eau turbide, d'origine rhodanienne, à l'ouest, et les eaux plus limpides du bassin situé à l'est de cette limite.

Il faut, cependant, signaler qu'en dépit de cette discontinuité hydrologique marquée et de l'entraînement prépondérant, vers l'ouest, des rejets du Rhône, ces derniers peuvent à quelques occasions, se manifester également dans les secteurs situés à l'est de l'embouchure du fleuve, entraînés superficiellement par le contre-courant côtier.

Ainsi, l'étude de la composition des vases terrigènes côtières du golfe de Marseille, a démontré l'importance de la contribution rhodanienne à la mise en place de ces dépôts sédimentaires. En outre, la délimitation de ces dépôts a permis de constater, en quelques années, une progression plus ou moins régulière de l'envasement des fonds du golfe.

Par ailleurs, j'ai pu constater, le 20 septembre 1969, pendant une assez longue période de beau temps, une anomalie de distribution thermique, étendue à l'ensemble du bassin (fig. 10) et de toute évidence imputable aux apports du Rhône ou de l'Étang de Berre (Minas, 1968).

Ainsi, contrairement à ce qu'il est habituel de mesurer, on pouvait noter, ce jour là, un maximum de température situé à une profondeur de 8 à 15 mètres, suivant la coupe joignant le cap Méjean à l'île de Planier (à la

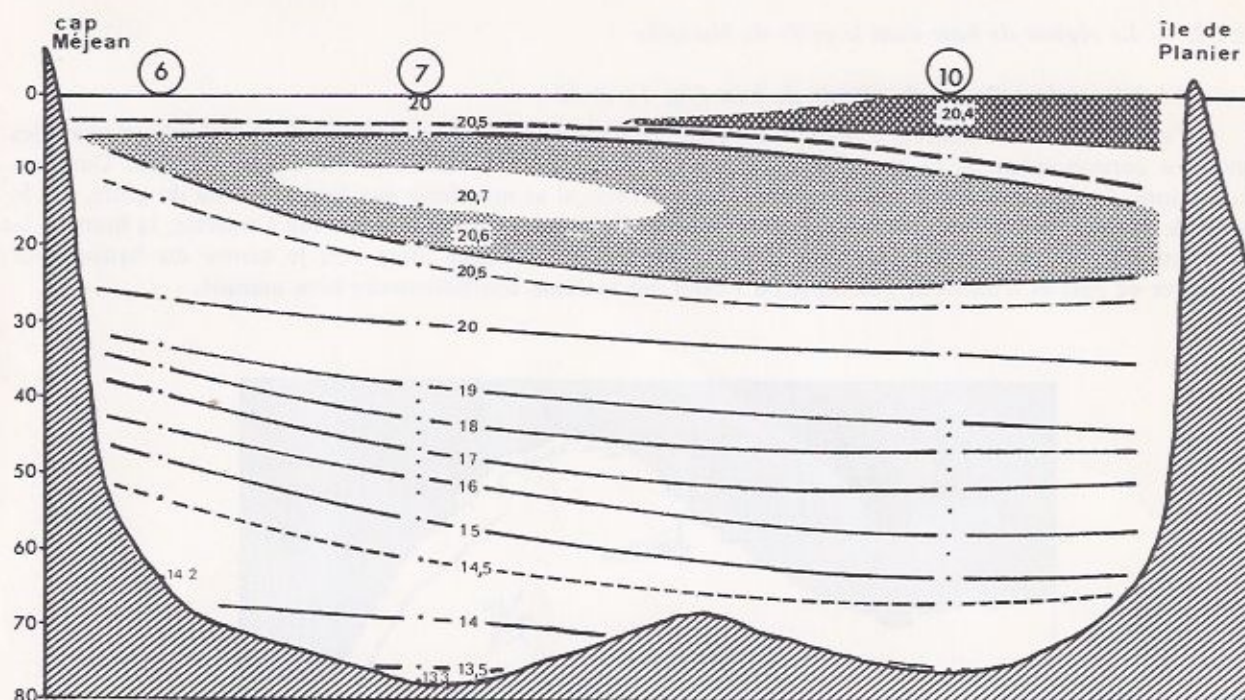


Figure 10 — Coupe hydrologique du secteur de Marseille, montrant, par régime de temps calme, une anomalie superficielle du gradient thermique.

station n° 7, 20,0°C en surface et 20,7° à 10 m). Parallèlement, les résultats de mesures de température et salinité, réalisées ce même jour, par Lecampion (communication personnelle), d'une part, en un point situé à 15 milles nautiques au sud de l'île de Riou et d'autre part, dans la baie de Cassis, complètent cette observation en mettant en évidence l'importance de la zone de transit des eaux du Rhône dans cette direction. Ces mesures permettent également de suivre une partie du trajet du contre-courant de la Nerthe, marqué par cette nappe d'eau plus froide et dessalée.

En effet, on peut signaler le passage de ce contre-courant jusqu'au point situé au large de Riou, par un léger refroidissement superficiel de 0,05°C entre la surface et 5 mètres de profondeur, ainsi que par un abaissement de salinité, au-dessous de 38 ‰ dans les 10 premiers mètres, alors que dans la baie de Cassis, non affectée par le passage de ces masses d'eau, la salinité de l'ensemble de la couche superficielle est en tous points supérieure à 38 ‰.

TABEAU 2

Mesures de température et de salinité observées le 20 septembre 1969 dans les parages de Marseille.

Prof.	large Riou		Cassis
	T °C	S ‰	S ‰
0 m	20,92°	37,985	38,080
5 m	20,97°	37,958	38,005
10 m	20,90°	37,975	38,002
20 m	18,32°	38,052	38,115

3.1.2. — Le régime de base dans le golfe de Marseille

3.1.2.1. — Installation du régime de base (fig. 11 et 12)

J'ai pu faire des mesures, à deux occasions, juste après la cessation du mistral, ce qui m'a procuré des mesures correspondant à ce que l'on peut considérer comme l'installation du régime de base. Dans ces conditions, la dérive générale des eaux du littoral provençal se manifeste aux limites même du golfe, dès le seuil de Planier qu'elle franchit en direction du cap Couronne. En doublant le cap Croisette, la branche la plus littorale de cette dérive est diffractée sur ce cap et se dirige alors vers le centre du bassin pour instaurer de part et d'autre de l'archipel du Frioul, un système tourbillonnaire bien marqué.

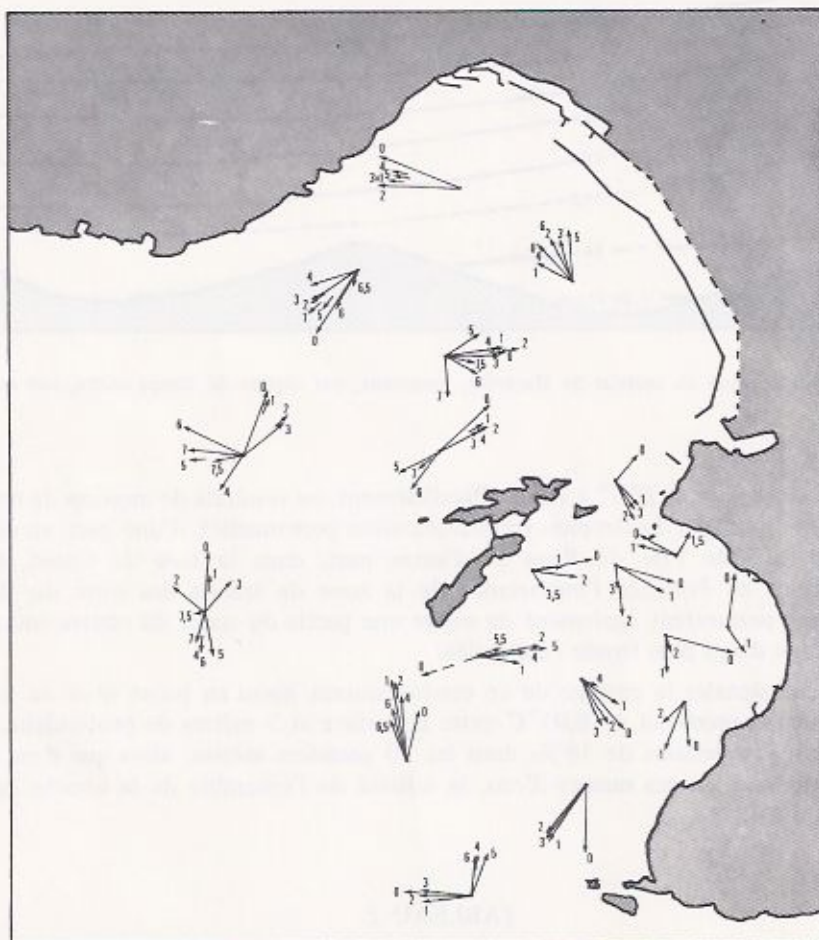


Figure 11 — Résultats des mesures de courant effectuées en période d'installation de régime de temps calme ou régime de base.

La profondeur est exprimée en dizaine de mètres à l'extrémité de chaque vecteur et la vitesse est proportionnelle à la longueur du vecteur (0,66 cm = 10 cm/s).

a) Dans la rade Nord.

Le courant entrant dans la rade Nord, par sa bordure méridionale, est constitué par une épaisse couche d'eau circulant dans les 40 premiers mètres (vitesse d'entrée : de l'ordre de 10 à 14 cm/s). Ceci a pour effet d'induire, dans le sens positif (sens inverse des aiguilles d'une montre), une giration de toute la masse d'eau du bassin.

Au-delà de 40 mètres de profondeur, sous la veine d'afflux méridionale de la rade, on note, sans transition apparente, un courant de compensation profond, refoulé vers le large à la vitesse moyenne de 9 cm/s.



Figure 12 — Schémas des circulations superficielles (S) et profonde (P) en période d'installation de régime de base.

b) Dans le bassin méridional.

Au-delà des îles du Frioul, le mouvement tournant dans le sens des aiguilles d'une montre cette fois, intéresse dans toute sa profondeur, la plus grande partie du bassin. Ce mouvement tourbillonnaire, assez excentré vers les fonds les plus importants du bassin Sud, permet l'installation d'un contre-courant balayant le rivage, depuis la plage du Prado vers la pointe d'Endoume. La circulation très homogène, observée ici, dans toute l'épaisseur du volume d'eau, exclut la possibilité d'installation d'un mécanisme de compensation près du fond. Cependant, le bilan du transport, forcément équilibré puisqu'il n'y a pas de variation de niveau, s'explique alors assez mal avec la seule surverse superficielle du seuil d'Endoume. Ceci conduit à penser que l'on a dans ces conditions, un très faible apport d'eau extérieur mais un entraînement* de bordure, au contact de la dérive générale et par conséquent, un recyclage momentané d'une même masse d'eau. Compte tenu de la fréquence élevée des coups de mistral sur la région et par conséquent, de ses accalmies consécutives, ce régime courantologique s'exerce en définitive très souvent dans le bassin.

3.1.2.2. — *Le régime de base, proprement dit (fig. 13 et 14)*

Ce mode de circulation des eaux du golfe ne se manifeste qu'à la faveur d'installations relativement longues (5 à 10 jours) de périodes de beau temps. A partir du schéma d'installation du régime de base, on passe progressivement au mode bien établi, avec la mise en place définitive du mouvement anticyclonique occupant la région occidentale du secteur de Marseille.

a) Circulation de la rade Nord.

Dans ces conditions, la rade septentrionale du golfe est le siège d'un système courantologique assez complexe dans le détail et induit par le passage du contre-courant littoral de la Nerthe. En abordant l'accident topographique de l'archipel du Frioul et les masses d'eau coincées dans la rade de Marseille, le contre-courant de la Nerthe, se sépare en trois couches d'inégale importance.

— La couche superficielle, profonde d'une trentaine de mètres, se déplaçant à la vitesse de 20 cm/s aux limites du golfe, est déviée au niveau de l'île de Ratonneau, vers le centre du bassin, plus au nord. La

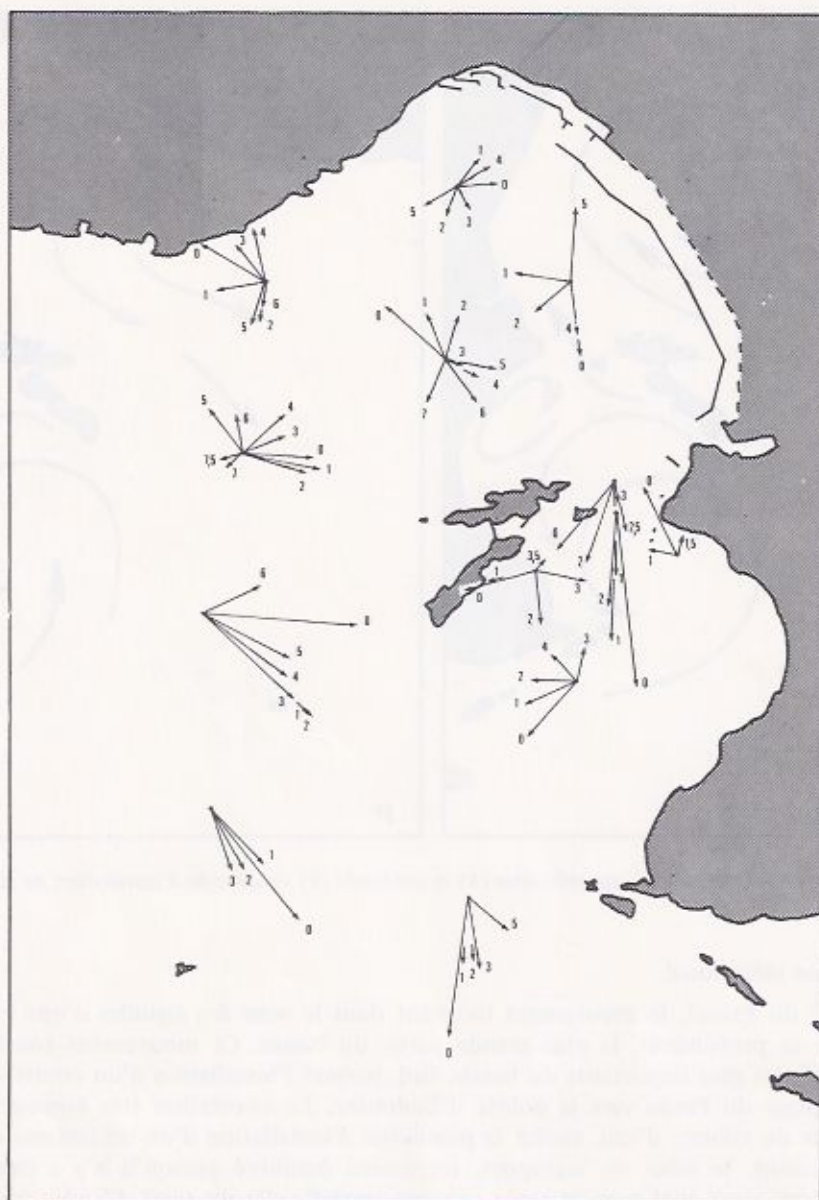


Figure 13 — Résultats des mesures de courant effectuées par régime de temps calme. La profondeur est exprimée en dizaine de mètres à l'extrémité de chaque vecteur, et la vitesse proportionnelle à la longueur du vecteur (0,66 cm = 10 cm/s).

veine traverse ainsi la rade et tend à en sortir à proximité du cap Méjean, donnant naissance à un premier mouvement tourbillonnaire superficiel A. Ce mouvement tournant, installé à l'entrée de la rade, induit dans le fond de celle-ci une autre giration B intéressant également les 20 à 30 premiers mètres d'eau.

— La couche intermédiaire, se situe de - 40 à - 60 mètres pour les stations les plus au large et de - 30 à - 40 mètres plus près des côtes. La circulation relevée dans cette nappe rappelle très vaguement celle de surface, avec un certain décalage vers le large.

— Par contre, la couche profonde formée par les 5 à 10 derniers mètres, reproduit exactement le tracé déjà observé lors du régime d'installation, avec un écoulement de l'eau de fond, suivant la ligne de pente de la rade, à la vitesse de 5 à 7 cm/s.

b) Circulation dans le bassin Sud,

Les diverses mesures obtenues dans ce bassin lors de longues périodes de beau temps, se répartissent en deux séries de résultats, assez dissemblables et liées aux variations des limites de passage du contre-courant de la Nerthe.



Figure 14 — Schémas des circulations superficielles (S) et profonde (P) lors de régime de base.

— La première série de mesures (fig. 15 et 16), recueillies les 7 et 8 octobre 1969, montre dans ce bassin, une circulation qui rappelle encore le régime d'installation. Dans ce cas, le passage du contre-courant de la Nerthe quelque peu écarté de la pointe de Croisette, laisse pénétrer dans le bassin, la veine littorale du courant liguro-provençal qui engendre à nouveau dans cette partie du golfe, un mouvement tournant de toute la couche d'eau. La comparaison entre les vitesses de déplacement de cette giration (7 à 12 cm/s) et celles du contre-courant occidental du golfe (vitesse supérieure à 20 cm/s), souligne nettement la différence d'origine et la profonde discontinuité existant entre ces deux mécanismes hydrodynamiques, installés à proximité l'un de l'autre.

— La série suivante de relevés (fig. 13 et 14), observée les 27 juillet 1967 et 18 septembre 1969, dans des conditions météorologiques très voisines, permet de constater en premier lieu, que le contre-courant de la Nerthe se manifeste alors aux limites mêmes du golfe. D'autre part, la couche superficielle du bassin méridional, épaisse d'une vingtaine de mètres, se déplace beaucoup plus rapidement (15 à 20 cm/s), depuis la passe d'If vers le seuil de Planier suivant une trajectoire approximativement orientée nord-sud. Ce courant superficiel converge et se greffe, donc, sur le contre-courant circulant à l'extérieur du bassin. Le courant traversant la passe d'If est, en partie, diffracté par la pointe d'Endoume et donne ainsi naissance, dans cette rade, à un petit mouvement tourbillonnaire côtier. Enfin, on peut encore noter avec ces mesures, dans la partie centrale du bassin, à partir de 30 mètres d'immersion, l'amorce d'un courant de fond dextrogyre, comme dans les deux cas précédents.

3.1.2.3. — Conséquences hydrologiques du régime de base

Il est classiquement admis que pendant la période estivale et en début d'automne (période de l'année où se manifeste de façon fréquente et prolongée, ce régime de courant non perturbé par les vents), la circulation du bassin occidental méditerranéen draine vers le littoral provençal, les eaux superficielles, caractérisées par un important gradient de température. Cette première évolution des masses d'eau d'origine atlantique s'accompagne, par suite d'évaporation intense, d'une augmentation de salinité, jusqu'à dépasser le seuil de 38 ‰ caractérisant les eaux méditerranéennes. Dans ces conditions, les rivages balayés par la dérive



Figure 15 – Résultats de mesures de courant effectuées par régime de temps calme. La profondeur est exprimée en dizaine de mètres à l'extrémité de chaque vecteur et la vitesse est proportionnelle à la longueur du vecteur (0,66 cm = 10 cm/s).

liguro-provençale, ont tendance à accumuler la couche d'eau superficielle. Ce mécanisme hydrodynamique se traduit donc sur nos côtes, par une augmentation de température des eaux ou encore par une augmentation d'importance de la couche superficielle, homotherme chaude. J'ai pu vérifier cette évolution hydrologique, en comparant des mesures de température relevées pendant une période de 18 jours de très beau temps en un même point de la rade de Marseille (fig. 12). Le graphique obtenu, montre en fonction du temps, l'épaississement de la couche limitée par l'isotherme 20°C. L'accumulation de cette masse d'eau quasiment homotherme, s'accompagne d'un rejet hors du bassin des couches sous-jacentes, plus froides. Parallèlement, la coupe hydrologique relative aux températures et réalisée à partir des observations du 20 septembre 1969, suivant les radiales joignant les stations de mesure : 4, 7, 12 et le point y situé à 15 milles nautiques au sud de Riou (fig. 18), souligne, cette fois dans l'espace (en faisant abstraction de l'accident thermique très superficiel précédemment évoqué), une accumulation d'eau superficielle aux limites du golfe, avec un enfoncement maximum des isothermes à la station 7. Les mesures de courant montrent précisément en ce point, l'affrontement du contre-courant de la Nerthe et des masses d'eau coincées dans le golfe. Dans la rade septentrionale, la comparaison des mesures de température relevées aux stations 4 et 7, ne semble vérifier la circulation observée qu'au niveau de la couche profonde. En effet, l'inclinaison régulière de l'isotherme 14°C, dont la plus grande immersion se situe à l'intérieur de la rade, montre bien

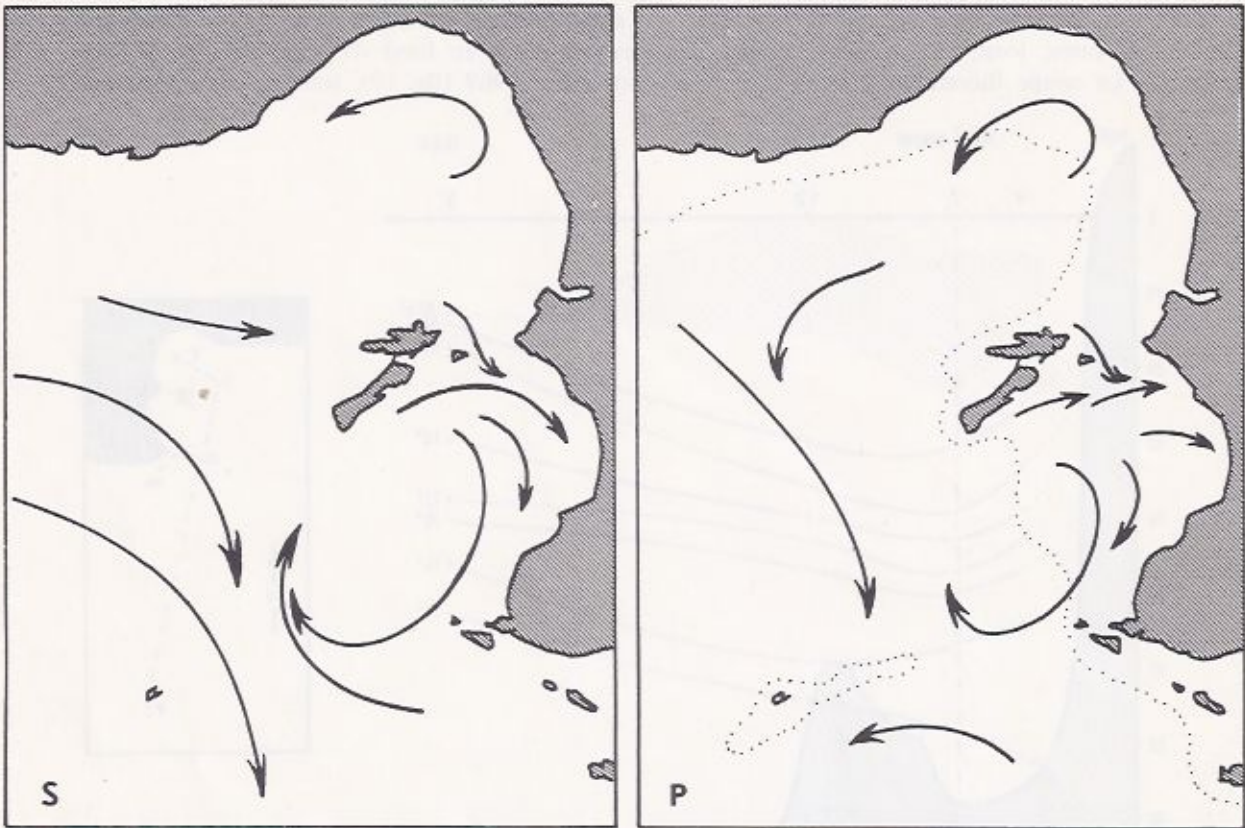


Figure 16 — Schémas des circulations superficielles (S) et profonde (P) lors de régime de base.

le refoulement vers le large de cette eau de fond. Cependant, il est assez gênant d'expliquer, sur ce schéma, à quel niveau se localise l'entrée d'eau dans la rade car les tracés de tous les isothermes semblent indiquer également, un transport dirigé depuis le centre du bassin vers l'extérieur.

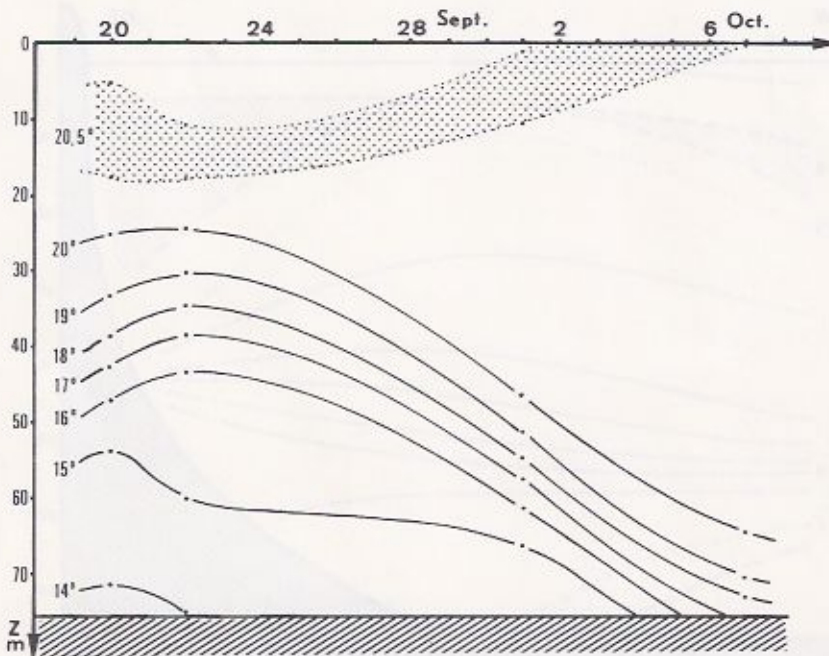


Figure 17 — Evolution thermique des eaux du golfe de Marseille pendant une période de temps calme.

En fait, il existe bien un apport superficiel ou sub-superficiel qui apparait au niveau des distributions de températures, lorsque l'on tient compte des mesures faites en fond de rade, près de la jetée, à la station 3. La coupe thermique, ainsi établie le 17 septembre 1969 (fig. 19), tout en conservant une allure

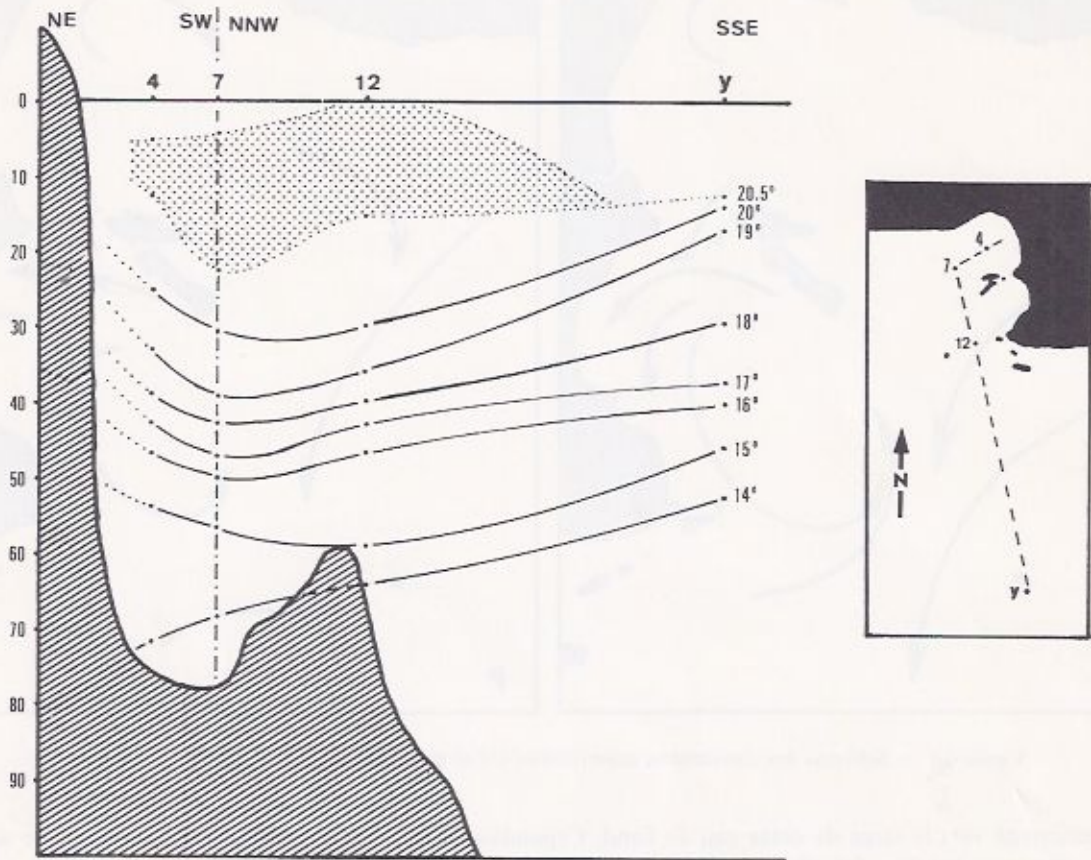


Figure 18 - Température des eaux des parages de Marseille le 20 sept, 1969.

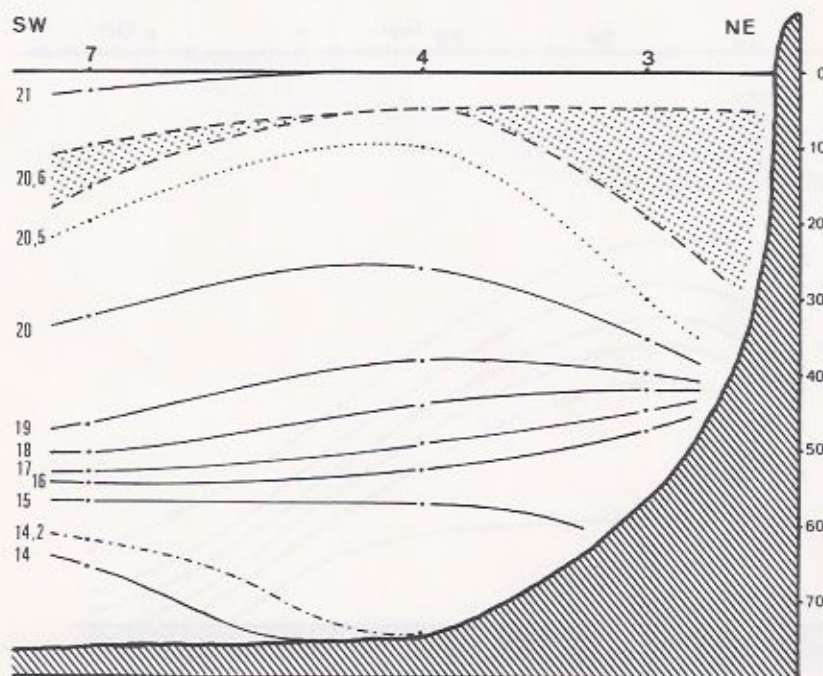


Figure 19 - Distribution des isothermes dans l'axe de la rade Nord. Mesures obtenues par régime de temps calme le 17 sept, 1969.

semblable au précédent tracé, entre les points 7 et 14, met en évidence près des installations portuaires, une nette accumulation superficielle, caractérisée notamment par la mise en place d'une couche homotherme de $20,6^{\circ}\text{C}$ et par un enfoncement sensible de l'isotherme de 20°C .

3.2. — Les courants de vent dans le golfe de Marseille

Compte tenu, des possibilités de travail avec les bateaux disponibles, suivant l'état de la mer, les enregistrements visant à saisir les modalités de circulation sous l'influence des vents, n'ont pu être effectués que lors de déplacements d'air modérés de l'ordre de 15 à 20 nœuds (7 à 10 m/s, d'après les relevés de l'observatoire). Les mesures réalisées dans ces conditions, ont été limitées en extension, à la zone relativement abritée du golfe et moins souvent répétées que les précédentes. Toutefois, les résultats obtenus, vérifient assez logiquement le comportement des courants de vent à la côte et les modifications hydrologiques qu'ils engendrent dans le bassin.

3.2.1. — Le régime de mistral-tramontane

L'observation de ce régime n'a pu être réalisée, au cours de ce travail dans le golfe, que par deux fois, les 30 octobre et 9 décembre 1969. La première série de mesures a été effectuée en début d'installation d'un flux modéré (7 m/s) de secteur N à NW, alors que la deuxième a été obtenue juste après un fort coup de mistral (rafales de 20 m/s le deuxième jour de l'installation de ce coup de vent qui a duré 6 jours).

3.2.1.i. — Régime de mistral modéré (fig. 20 et 21)

La circulation dans le golfe, sous l'influence d'un mistral modéré, montre nettement la tendance générale du départ de l'eau de surface vers le large et plus profondément, le mouvement de compensation inverse.

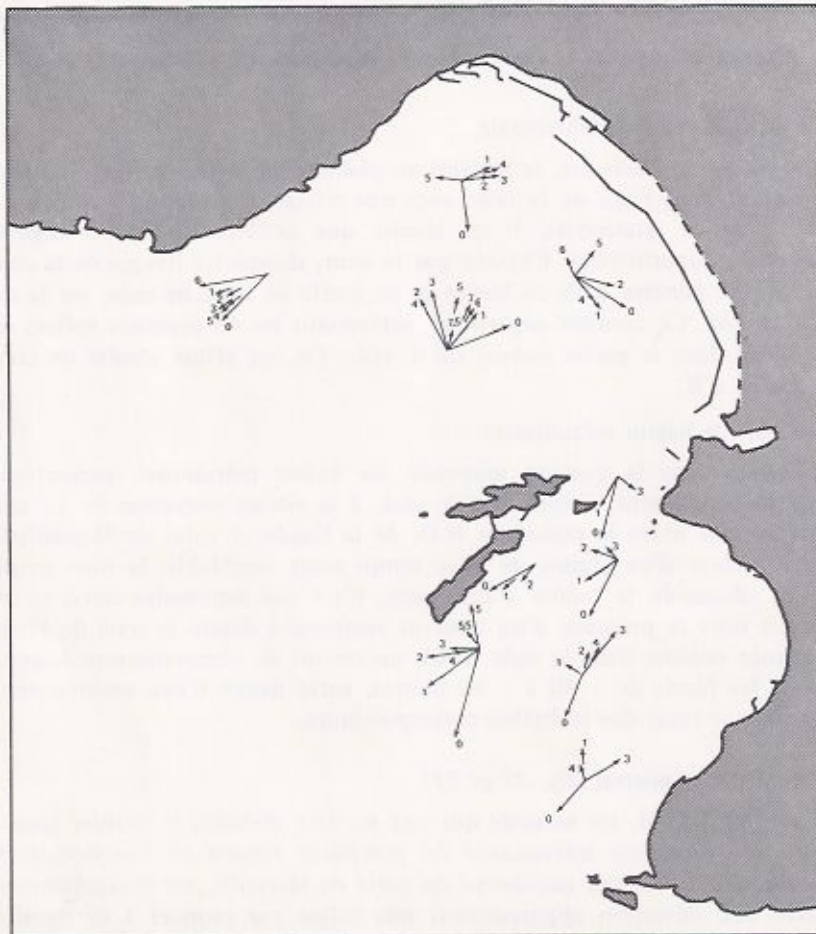


Figure 20 — Résultats des mesures de courant effectuées par régime de mistral modéré. La profondeur est exprimée en dizaine de mètres à l'extrémité de chaque vecteur et la vitesse du courant est proportionnelle à la longueur du vecteur (0,66 cm = 10 cm/s).

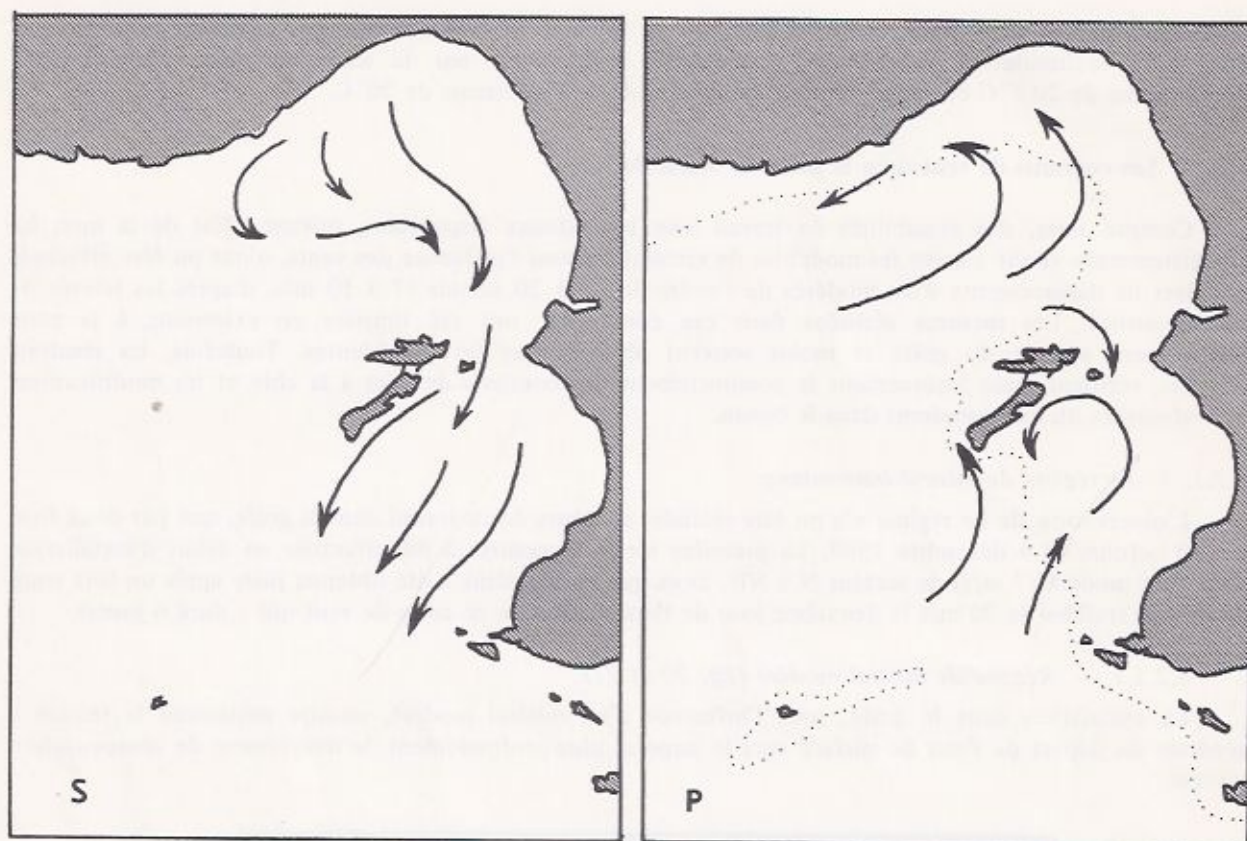


Figure 21 – Schémas des circulations superficielles (S) et profonde (P) par régime de mistral modéré.

a) La circulation dans la rade septentrionale.

Au niveau du mouillage de l'Estaque, se localise un phénomène d'"up-welling" côtier, alimenté par un courant profond remontant dans l'axe de la rade, avec une vitesse avoisinant 10 cm/s à 5 mètres au-dessus du fond, au centre du bassin (station 4). Il en résulte que cette zone est le siège d'un mouvement divergeant des masses d'eau superficielles. Chassée par le vent, depuis les rivages de la chaîne de l'Estaque, la couche d'eau superficielle pénètre dans ce bassin et se greffe en fond de rade, sur la dérive qui longe la grande jetée, du nord au sud. Ce courant superficiel, intéressant les 40 premiers mètres environ, provoque un important apport d'eau dans la partie sud-est de la rade. De cet afflux résulte un courant franchissant du nord au sud les passes d'If.

b) La circulation dans le bassin méridional.

Les résultats obtenus dans la portion moyenne du bassin méridional, permettent de suivre une circulation de surface uniformément dirigée vers le sud, à la vitesse moyenne de 12 cm/s. L'absence de mesure dans la baie comprise entre le massif de N.D. de la Garde et celui de Marseilleveyre, est tout de même regrettable car à l'image d'un régime de beau temps assez semblable, la mise en place d'un remous tourbillonnaire dans le sillage de la pointe d'Endoume, n'est pas impossible avec ce régime de mistral modéré. Sur le fond, on note la présence d'un courant remontant depuis le seuil de Planier vers l'archipel du Frioul, pour constituer comme dans la rade Nord, un circuit de compensation. A proximité de l'île de Pomègues, en abordant les fonds de -40 à -30 mètres, cette nappe d'eau amorce une giration dans le sens négatif, endiguée dans le tracé des isobathes correspondants.

3.2.1.2. – Régime de fort mistral (fig. 22 et 23)

Dans la zone d'abri du Frioul, les mesures qui ont pu être réalisées le dernier jour d'une période de fort mistral, montrent une évolution intéressante du précédent régime en fonction de la force du vent. Ainsi, la couche superficielle du secteur occidental du golfe de Marseille, est énergiquement drainée dans la direction du vent, avec une déviation apparemment très faible par rapport à ce dernier (*). D'après les

(*) On peut expliquer cette modification par le fait que lorsque la force du vent augmente, le déplacement des masses d'eau s'intensifie et intéresse des niveaux de plus en plus profonds. Or, si le bassin considéré ne présente pas une profondeur suffisante pour que s'exerce librement l'effet du vent, la déviation superficielle de 45°, à la droite du sens de propagation du vent, se trouve fortement diminuée.

mesures obtenues, on peut voir que, dans cette portion du bassin méridional, la couche d'eau superficielle, épaisse d'une vingtaine de mètres, ne suit plus le régime assez laminaire, observé précédemment, mais donne lieu à une circulation forcée et turbulente à proximité des accidents topographiques du bassin. L'accumulation d'eau sur les rivages situés au sud-est de la rade de Marseille, se déverse encore dans le bassin sud du golfe. Ce franchissement des passes d'If est à l'origine, dans le chenal compris entre Ratonneau et If, d'un remous tourbillonnaire superficiel dans le sillage de ce dernier. La veine canalisée entre la terre et If, se greffe sur un mouvement analogique installé dans la rade d'Endoume.

Mais le trait original de cette circulation de fort mistral réside dans le fait que la dérive superficielle entraînée depuis la côte de la Nerthe, double le cap Caveaux (extrémité sud de l'île de Pomègues) avec suffisamment d'énergie pour traverser le bassin d'ouest en est à plus de 20 cm/s. Aux environs de la Pointe-Rouge, ce courant transversal se bifurque pour déterminer d'une part, dans la rade d'Endoume une giration dans laquelle s'insère le courant de la passe orientale d'If, et d'autre part, sur les rivages du massif de Marseilleveyrè, un important courant d'afflux superficiel. En heurtant ainsi de plein fouet la côte, le flot incident exécute un mouvement plongeant à l'origine de toute la circulation profonde de ce bassin. En effet, au-delà de 20 mètres d'immersion, l'ensemble du volume d'eau sous-jacent se dirige vers l'ouest pour s'intégrer plus au large, au régime général d'upwelling qu'instaure le mistral sur les côtes provençales.

3.2.1.3. — Conséquences hydrologiques du régime de mistral

Les diverses études hydrologiques entreprises dans la zone nord-occidentale méditerranéenne ont montré que les fréquentes installations de mistral, sont à l'origine d'un mécanisme capital dans le comportement des eaux de ce bassin maritime. Ainsi, les vents de secteurs nord à NNW, durables, forts et froids chassent l'eau de surface des côtes septentrionales. Ce transit s'accompagne d'une évaporation et d'un refroidissement importants qui encourent à augmenter la densité de cette couche d'eau, jusqu'à provoquer sa plongée au niveau de la zone de convergence plus méridionale. (Ce comportement hydrodynamique n'est pas sans rappeler les phénomènes analogues se déroulant sous les latitudes circum-populaires de l'océan mondial). Par contre l'up-welling côtier, lié à ce mouvement superficiel, entraîne sur le plateau-continental des eaux d'origine sub-superficielle ou intermédiaire, plus froides et plus riches en sels minéraux nutritifs (Lacombe, Tchernia 1960, Minas, 1963, 1968 ; M. Travers, 1962). Dans le golfe de Marseille, les mesures physico-chimiques de Minas et A. Travers, les espèces planctoniques bathy-pélagiques capturées par Gaudy (1962) et les poussées phytoplanctoniques enregistrées par M. Travers après le passage d'un coup de mistral, sont autant de preuves de cette remontée d'eau sous-jacente dans le secteur considéré.

3.2.2. — Régime de vent d'est à sud-est (fig. 24 et 25)

3.2.2.1. — Description du régime courantologique

Les vents de secteur E à SE, soufflent sur la région de façon légèrement moins fréquente que le mistral mais par leur force et la durée de leurs installations, ils ont une importance très proche de celle de ce dernier. Les mesures de courant utilisées pour décrire le régime mis en place par ce vent n'ont pu être enregistrées, de façon plus ou moins complète, qu'au cours de quatre phases d'installation de vent d'est (21 janvier, 12 septembre, 17 octobre 1969 et 4 mai 1970). Par rapport au régime de mistral modéré, on note alors une inversion quasiment complète de circulation. La dérive superficielle de vent constitue très logiquement, sur les côtes provençales, un courant d'afflux qui franchit le seuil de Planier avec une direction SE-NW approximativement. La partie la plus littorale de ce courant est diffractée par l'avancée du cap Croisette et pénètre alors dans le golfe.

a) La circulation dans le bassin Sud.

La présence du promontoire de Croisette imprime au courant d'entrée, une trajectoire courbe qui tend à se refermer, en un mouvement tourbillonnaire, dans la zone abritée de ce vent par le massif de Marseilleveyre (au niveau de l'anse des Goudes à la Madrague de Montredon). Dans le reste du bassin, l'ensemble du volume d'eau se déplace en décrivant la concavité de la côte comprise entre les massifs de N.D. de la Garde et de Marseilleveyre. Sur la barrière insulaire du Frioul, cette circulation donne naissance à une accumulation d'eau de surface qui s'échappe, en partie, par les passes d'If. D'autre part, en bordure des rivages allant de la plage du Prado à la pointe d'Endoume, la trajectoire du courant de surface de ce bassin, subit une légère déviation, donnant lieu à un mouvement convergeant vers la côte. Le tracé ainsi observé, présentant une certaine analogie avec les orthogonales des trains de houles, est de toute évidence, le fait des forces de frottement rencontrées par la veine d'eau sur la côte et les petits fonds. En fonction de profondeurs croissantes, on observe un glissement vers le sud-est du centre de la courbure du

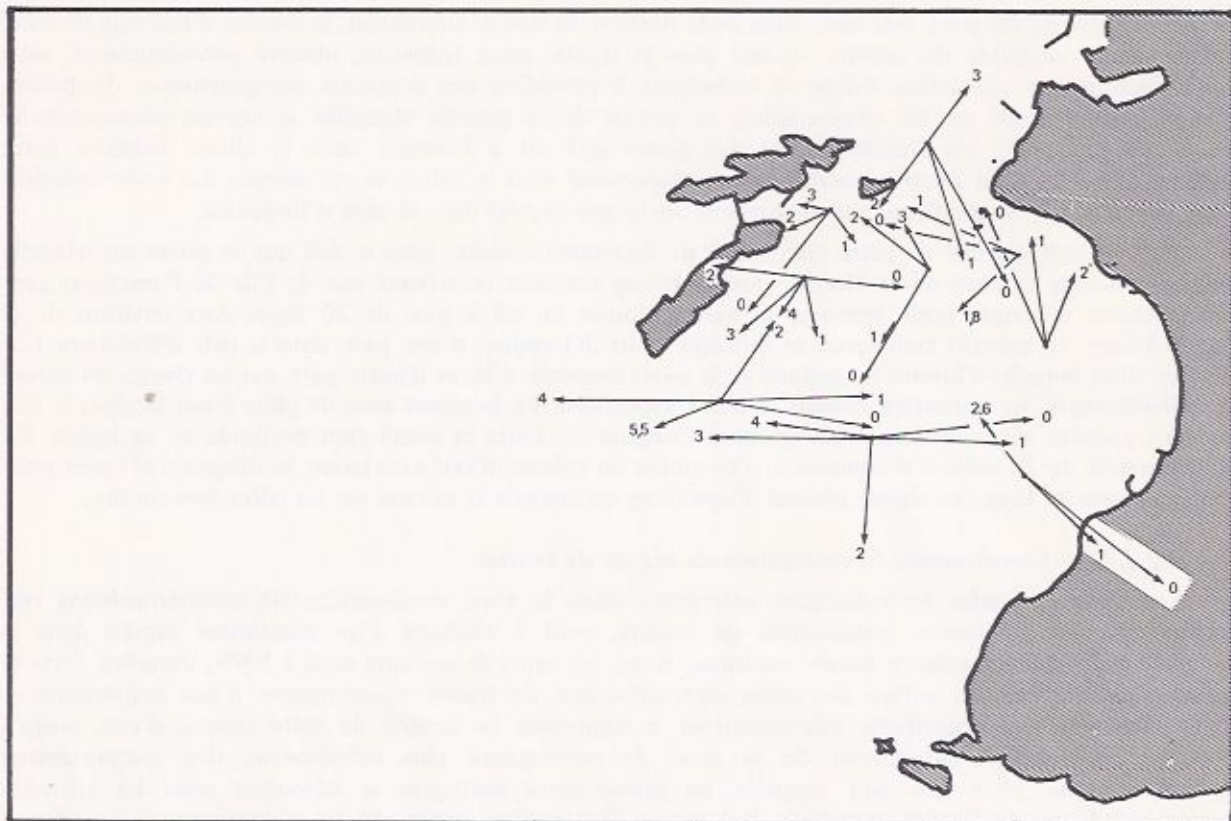


Figure 22 — Résultats des mesures de courant effectuées par régime de mistral fort. La profondeur est exprimée en dizaine de mètres à l'extrémité de chaque vecteur et la vitesse est proportionnelle à la longueur de vecteur ($0,66 \text{ cm} = 10 \text{ cm/s}$).

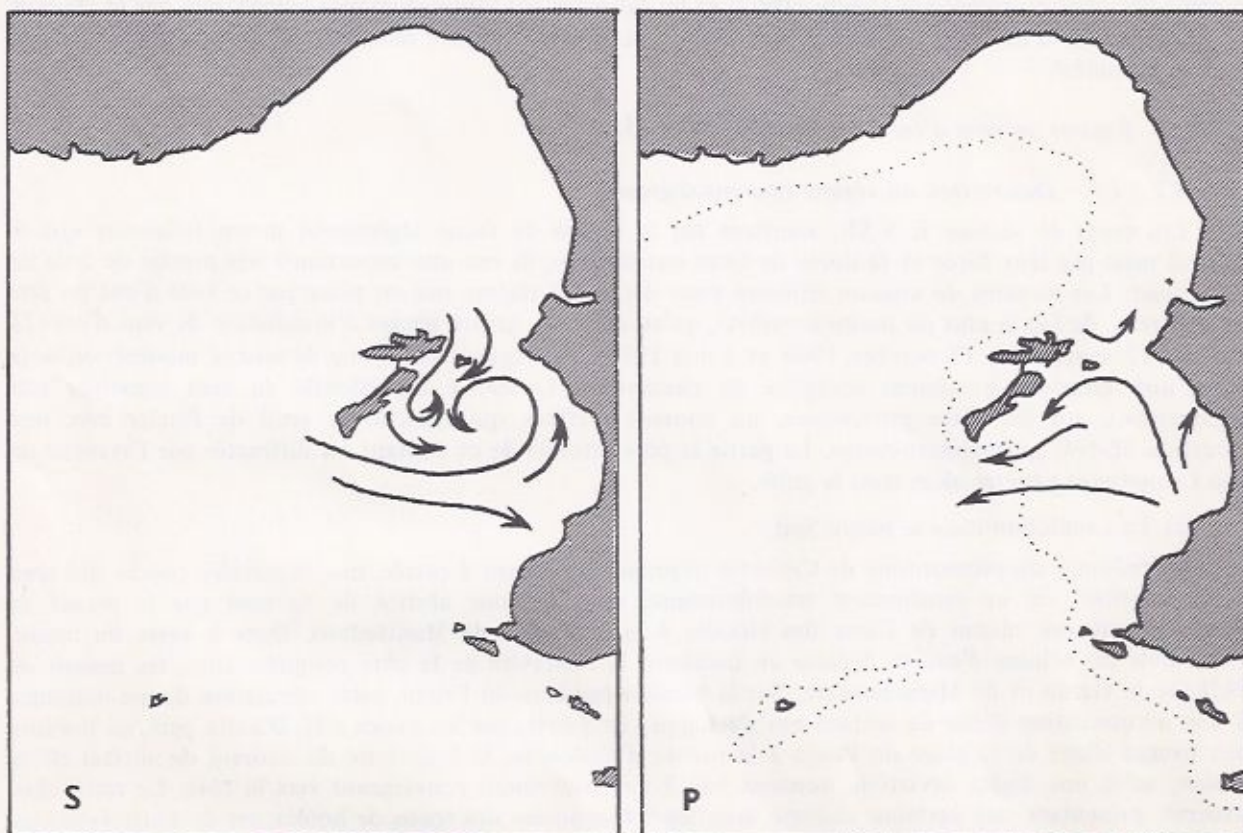


Figure 23 — Schémas des circulations superficielle (S) et profonde (P) par régime de mistral fort.



Figure 24 — Résultats des mesures de courant effectuées par régime de vent d'est. La profondeur est exprimée en dizaine de mètres à l'extrémité de chaque vecteur et la vitesse est proportionnelle à la longueur du vecteur (0,66 cm = 10 cm/s).

mouvement superficiel. Ce décalage permet à la couche d'eau, circulant sur les fonds situés de 20 à 30 mètres d'immersion, d'effectuer un mouvement de rotation complet, analogue à celui mis en place par le régime de mistral modéré. Par contre, au delà de l'alignement cap Caveaux, cap Croisette (limite de ce bassin vers le large), sur les fonds excédant 50 mètres de profondeur, la nappe d'eau profonde suit une direction nettement orientée vers le large. Ce dernier transport est le résultat de l'excédant d'apport d'eau superficielle dans le bassin Sud du golfe que le chenal de la pointe d'Endoume au Frioul ne compense pas totalement.

b) La circulation dans la rade Nord.

Avec une couche d'eau de profondeur plus importante, la rade de Marseille (rade Nord) est dans l'ensemble, le siège d'une circulation assez proche du mécanisme hydrodynamique dont l'installation est classiquement admise sur nos côtes, lors de périodes de vent d'est (comportement des courants de vent à la côte). La couche superficielle de la rade, épaisse d'une quarantaine de mètres environ, suit une trajectoire qui rappelle, dans les grandes lignes, la circulation de surface du bassin méridional. Ainsi, la veine arrivant du large par le seuil de Planier, est déviée par les îles de Pomègues et Ratonneau, vers les rivages du sud-est de la rade. A ce niveau se greffe le courant des passes d'If et la couche superficielle tend à longer, par la



Figure 25 — Schémas des circulations superficielle (S) et profonde (P) par régime de vent d'Est.

suite, la grande jetée du sud au nord, avec sur cet édifice, un angle d'incidence de plus en plus faible au cours de sa progression. Au nord du bassin, près des rivages de la chaîne de la Nerthe, entre l'Estaque et le cap Méjean, la couche de surface davantage exposée à l'entraînement du vent, est nettement dirigée vers la côte. Cette reprise d'effet du vent d'est, en dehors du secteur relativement abrité de la rade, ne s'exerce que sur une couche d'eau d'assez faible profondeur (5 à 20 m). La quasi totalité des mesures obtenues dans ce bassin, montrent au-dessous de la couche superficielle, l'existence, sans transition bien marquée, d'une couche profonde qui compense l'accumulation d'eau au nord de la rade. Le transport profond s'effectue donc depuis le rivage de la Nerthe vers le centre du bassin et par la suite rejoint la circulation établie à l'extérieur du golfe.

Avec les moyens matériels mis à la disposition de cette étude, il n'a pas été possible de procéder à des mesures, suffisamment tôt après un fort coup de vent d'est comme précédemment pour le mistral. Cela tient au fait que les tempêtes de nord-ouest se forment à partir de la côte et sont, par conséquent, suivies d'un rapide retour au calme dans le golfe lorsque cesse le vent. Par contre, la mer formée par vent d'est, s'amortit plus lentement, en laissant pénétrer dans le golfe une assez forte houle résiduelle. Dans ces conditions, les séries d'enregistrements effectuées, dès les possibilités de travail rétablies, se sont avérées très peu significatives d'une circulation de vent. Par contre, ces mesures peuvent être interprétées comme une circulation régie par des courants de gradient ou de pente qui, naissant du déséquilibre hydrologique engendré par les courants de dérive (courants de vent), s'opposent et neutralisent rapidement le circuit de vent préexistant.

3.2.2.2. — Conséquences hydrologiques du régime d'est.

Le mécanisme hydrodynamique engendré par le vent d'est sur le littoral provençal est, d'une façon générale, semblable à celui observé lors de régime de beau temps. Le bilan du transport des masses d'eau admet donc encore pour schéma, une arrivée d'eau à la côte par la surface et un départ de la couche plus profonde vers le large. Ce circuit peut-être vérifié ou mis en évidence par l'étude de paramètres physico-chimiques. Parmi ces paramètres, la température permet déjà de différencier la configuration des diverses strates de l'eau superficielle méditerranéenne, en particulier, lorsque celle-ci présente un important

gradient thermique (à la saison chaude). Ainsi, suivant l'axe NE-SW de la rade de Marseille (entre les stations 3 et 4), la coupe thermique (fig. 26) établie à partir des mesures de température réalisées dans les quelques heures qui ont suivi la naissance d'un violent coup de vent d'est (12 septembre 1969), montre, par le tracé des isothermes des 40 à 45 premiers mètres d'eau, un important transport vers la côte de cette couche superficielle. Cette accumulation d'eau en fond de rade concorde parfaitement avec les mesures courantologiques (fig. 27) effectuées à la station 4, de la surface jusqu'à 40 mètres de profondeur.

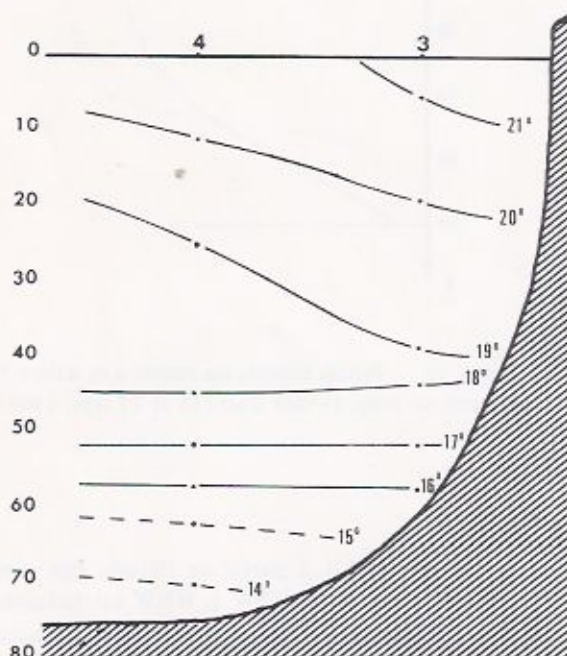


Figure 26 — Coupe hydrologique (Température) de la rade Nord du golfe de Marseille.

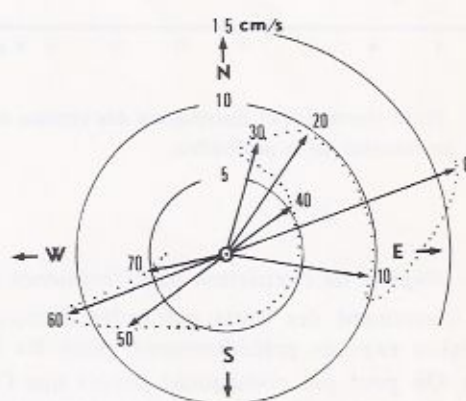


Figure 27 — Mesure du courant enregistrée à la station 4, en début de régime de vent d'est.

Cependant d'après cette coupe thermique, les modifications hydrologiques en cours ne semblent pas encore affecter la couche d'eau sous-jacente dont les isothermes de 18 à 16°C marquent une stratification régulière et à peu près horizontale. Mais il faut signaler que le rejet de la couche profonde hors du bassin (au-delà de 60 mètres), ne peut pas être nettement mis en évidence sur ce graphique, faute d'un troisième point de mesure pris sur des fonds voisins de 75 mètres pour tracer avec certitude l'inclinaison des isothermes de 14 et 15°C. En fait, la comparaison des profils thermique et courantologiques (vitesse et direction), obtenus à la station 4 (fig. 27 et 28), démontre plus nettement l'existence de deux couches d'eau, d'épaisseur à peu près équivalentes mais de caractéristiques opposées. La couche superficielle, occupant les 40 premiers mètres sous la surface, est uniformément dirigée vers le fond de la rade (au NE), avec une variation de vitesse importante et continue (vitesse variant de 16,4 à 5,3 cm/s entre la surface et -40 m). La température relativement élevée de cette couche, ne varie que dans de faibles limites (20,6 à 18,5°C). Inversement, la couche inférieure s'écoule suivant la ligne de pente de la rade, avec un maximum de vitesse (11,4 cm/s) à une quinzaine de mètres du fond. La courbe de température caractérise également cette couche par une variation régulière et assez importante en passant de 18,5°C à 13,8°C depuis la discontinuité thermique située au-delà de -40 mètres (rupture de pente du graphique) jusque sur le fond.

Enfin à l'apport d'eau superficiel qu'engendre ce vent, s'ajoute une agitation et un brassage toujours importants qui ont pour résultat, la rapide mise en place d'une épaisse couche homotherme chaude. Ainsi, au point de station n° 3, les profils thermiques obtenus au début et après le passage de cette tempête de vent d'est (fig. 29), montrent bien cette évolution hydrologique caractérisée par l'apparition d'une thermocline vers 40 mètres de profondeur, séparant deux couches d'eau de distribution thermique très homogène chacune.

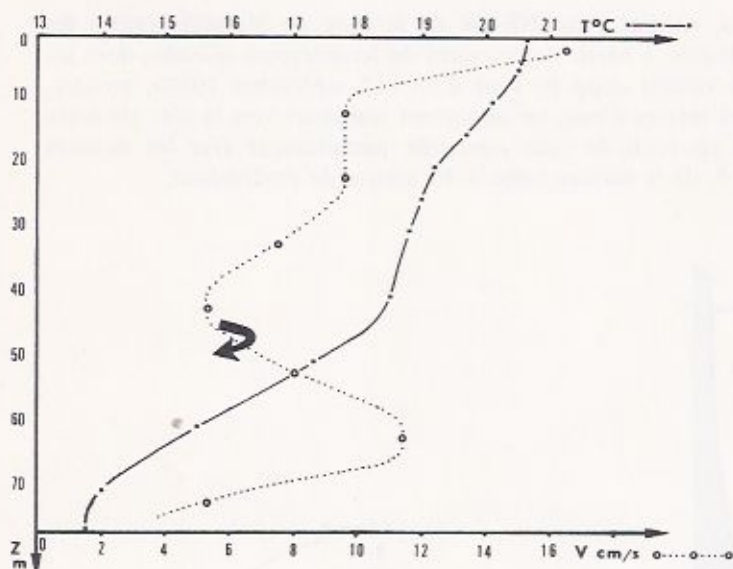


Figure 28 — Profil thermique et distribution des vitesses du courant à la station 4, en fonction de la profondeur.

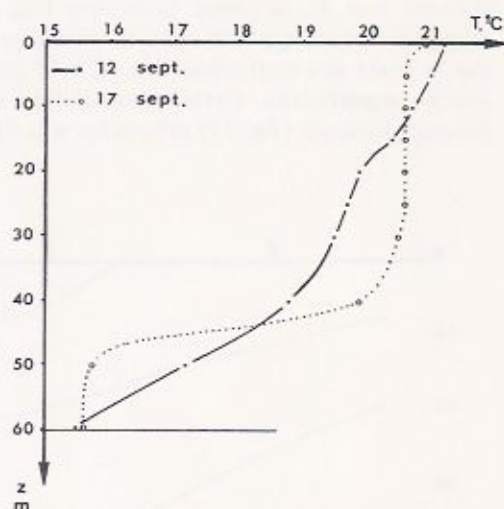


Figure 29 — Profils thermiques relevés à la station 3 avant et après un coup de vent d'est (12 et 17 sept. 1969).

3.2.3. — Régime de circulation sous l'influence des vents d'ouest

Le classement des vents par ordre d'importance, qui a pu être établi à partir de l'étude des vents de la région exposée précédemment, place les flux atmosphériques de secteur WSW à WNW en troisième position. On peut par conséquent penser que l'influence des vents d'ouest sur l'hydrodynamisme du bassin est également très importante, ne serait-ce qu'en considérant la forte agitation de surface qu'engendre la largade dans le golfe. Cependant, avec des installations très temporaires, ces vents ne se manifestent qu'après des périodes de vent d'est et constituent même généralement un terme de transition fugitif aux reprises de mistral. Ainsi, à cause de leur violence et de leur instabilité, il n'a pas été possible de procéder à des mesures de courant pendant ce régime de vent. Toutefois, en appliquant les principes théoriques qui régissent les courants de vent, il est fort probable que la circulation mise en place par la largade rappelle dans les grandes lignes le régime de mistral, d'orientation très voisine.

CONCLUSION

Au terme de cette description des quelques régimes courantologiques observés dans le golfe de Marseille, rappelons tout d'abord que cette étude de circulation littorale n'a pu être réalisée avec les modestes moyens matériels dont nous disposions, sans une adaptation préalable de la méthode d'utilisation au cadre du secteur de travail. L'emploi des courantomètres enregistreurs installés sur un mouillage classique à point fixe, avec un flotteur de sustentation immergé ou encore en pendule depuis le bord du navire, s'est rapidement avéré insuffisant pour mener à bien ce travail. Cette première difficulté nous a conduit à réaliser et à mettre au point un accessoire de mise en œuvre des courantographes : la bouée à treuil. Cet appareil, facilement immobilisé en station fixe, exécute automatiquement une immersion progressive et intermittente de chaque enregistreur. L'autonomie totale du dispositif permet une mise en œuvre presque simultanée des appareils de mesure ce qui, dans une journée de travail en mer, augmente le nombre d'enregistrements en éliminant les pertes de temps importantes liées aux déplacements du navire d'une station à l'autre. Les résultats ainsi obtenus permettent de vérifier une étroite relation entre les conditions météorologiques de la région et les déplacements de masses d'eau du bassin étudié, conformément à l'idée générale qui se dégageait des diverses observations indirectes (paramètres physico-chimiques et biologiques). Ainsi, presque toutes les séries de mesures recueillies se distribuent aisément en quelques modes principaux de circulation comprenant :

- un régime de base, lors de périodes de beau temps.
- un régime de mistral, mis en place par les fréquents vents de secteur N à NW et auxquels s'ajoutent vraisemblablement les vents d'ouest.
- et enfin, un régime sous l'influence des vents de secteur est à sud-est.

La différenciation et la description de ces principaux régimes de circulation ont rapidement permis de justifier certaines observations et de confirmer quelques hypothèses impliquant à juste titre les paramètres courantologiques s'exerçant dans le secteur. Ainsi, le transport des masses d'eau conditionne en grande partie :

- l'équilibre ou l'évolution des sédiments meubles.
- l'installation de certains peuplements benthiques.
- ou le développement et le transit de populations planctoniques.

Enfin, face à la concentration, démographique et industrielle de la région marseillaise, impliquant une production et un rejet croissants de résidus divers, il est encore une conséquence qui peut être tirée de la connaissance des régimes courantologiques de ce secteur. Cette conséquence, plutôt dramatique, réside dans le fait que les alternances fréquentes de sens de circulation des eaux superficielles, tendent à faire transiter par le golfe de Marseille les rejets d'importants foyers de pollution marine, installés de part et d'autre de ce bassin. Ainsi, aux multiples sources de pollution implantées malheureusement au sein même du golfe, la circulation littorale semble pouvoir y ajouter soit, une large part des rejets de l'émissaire de Cortiou, soit alors, des polluants et pesticides drainés par le Rhône ou émis par les complexes industriels de l'étang de Berre et du golfe de Fos prochainement.

La généralisation de l'usage de produits non biodégradables, suivie d'un rejet pur et simple dans le milieu marin, sans grand souci de leur devenir, a déjà, permis aux biologistes de constater de graves dégradations irréversibles de cet environnement naturel. Cet état de fait démontre clairement l'insuffisance de la plus fréquente des solutions adoptées actuellement pour se débarrasser d'une partie des salissures domestiques et industrielles. Dans ces conditions, la prise en charge de ces résidus par la circulation littorale de la région marseillaise, entretient dans l'ensemble de ce site naturel un niveau de pollution qui a doré et déjà dépassé la cote d'alerte.

TABLEAU 3

Tableaux de mesures

Date : 17 sept. 1969 Météo. : vent calme de secteur variable. $V_{\text{moy.}} = 2,4 \text{ m/s}$			
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
23	0	18,2	223°
	10	19,2	180°
	20	17,5	200°
	30	10,5	168°
	fond	4,7	170°
3	0	8,8	294°
	10	9,5	163°
	20	6,6	148°
	30	9,1	118°
	40	5,8	108°
	50	12,2	285°
fond	3	41°	
5	0	8,3	85°
	10	7,1	40°
	20	6,6	200°
	30	5,8	148°
	40	8,3	60°
	50	8	240°
fond	3	230°	
6	0	11,6	89°
	10	7,7	263°
	20	8,1	252°
	30	7,1	20°
	40	9,6	97°
	50	?	?
60	?	?	
8	0	31,3	102°
	10	29,4	133°
	20	30,2	133°
	30	25,4	134°
	40	21,4	127°
	50	20,1	117°
	60	13	65°
	70	?	?
7	0	19,2	105°
	60	4,3	20°

Date : 18 sept. 1969. Météo. : mer belle, vent faible de secteur NE à W. $V_{\text{moy.}} = 3,3 \text{ m/s}$			
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
23	0	35,3	173°
	10	26	182°
	20	18,9	184°
21	0	15,4	335°
	10	5,5	280°
	15	4,6	20°
22	0	26,3	200°
	30	9,3	190°
18	0	14,6	254°
	10	9,9	256°
	20	11,1	173°
	30	10,8	101°
35	3	47°	

Date : 27 juil. 1967.			
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
23	0	19,5	163°
	10	9,5	306°
	20	?	?
	30	6,4	214°
4	0	15,5	355°
	10	7	64°
	20	7,2	78°
	30	7,7	160°
	40	?	?
	50	11,4	* 11°
	60	6,5	33°
	70	5,2	255°
fond	3,7	265°	
6	0	17,5	281°
	10	10	142°
	20	11,5	237°
	30	12	295°
	40	12	267°
	50	?	?
	60	14,5	286°
fond	10	280°	
16	0	15	223°
	10	11,5	247°
	20	9,5	271°
	30	6,5	14°
	40	7,7	316°

Date : 20 sept. 1969 Météo. : mer belle, vent faible de secteur NE à W, $V_{\text{moy.}} = 2,3 \text{ m/s}$			
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
4	0	9,7	325°
	10	6,7	245°
	20	10,8	274°
	30	9,6	317°
	40	10	93°
	50	7,3	198°
	60	11,4	200°
	70 fond	6,4 4,7	158° 170°
6	0	25,5	62°
	10	10	251°
	20	9,5	360°
	30	10,3	360°
	40	7,5	15°
	50	5	255°
	60 fond	? ?	? ?
7	0	14,2	93°
	10	16	102°
	20	13,6	106°
	30	9,1	70°
	40	11,9	50°
	50	11,4	325°
	60	7,7	355°
	70 fond	4,3 4,5	225° 250°
10	0	28,8	141°
	10	15,6	136°
	20	14,2	150°
	30	13	160°
	40	?	?
	50	?	?
	60 70	? ?	? ?
12	0	28,2	188°
	10	13,1	185°
	20	12,2	175°
	30	14,5	171°
	40	?	?
	50	10,2	130°
	60 fond	8,5 ?	120° ?

Date : 22 sept. 1969. Météo. : vent, $V_{\text{moy.}} = 1,9 \text{ m/s}$ de secteur N.E. à W.			
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
4	0	16,3	310°
	10	9,6	337°
	20	8,6	20°
	30	3,4	103°
	40	7,5	118°
	50	10,2	100°
	60	10,8	143°
	70	9,1	205°
3	0	14,2	171°
	10	11,6	280°
	20	9,4	230°
	30	?	?
	40	?	170°
	50 fond	15,3 ?	5° ?
6	0	15,2	300°
	10	10,2	260°
	20	8,3	190°
	30	9,9	320°
	40	11,1	346°
	50	9,3	200°
	60 fond	7,1 5,2	80° 190°

Date : 7 oct. 1969.

Météo. : vent calme de secteur ENE à W. $V_{\text{moy.}} = 2,1 \text{ m/s}$.

Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
23	0	6,8	190°	9	0	20,8	100°
	10	7,1	165°		10	20,4	110°
	20	8,2	155°		20	18,9	100°
	30	4,8	135°		30	18,1	107°
3	0	9,9	65°		40	18,5	108°
	10	6,8	65°		50	14,5	110°
	20	6,5	70°		60	7,3	100°
	30	5,8	73°		70	8,3	81°
	40	5,6	67°		fond	5,9	150°
	50	4,9	57°		10	0	40,6
fond	4,6	63°	10	21,4		150°	
5	0	4,6	255°	20		17	140°
	10	8	263°	30		13	120°
	20	7,8	252°	40		11,6	106°
	30	6,5	265°	50		14,2	120°
	40	6,6	253°	60		18	100°
	50	7	243°	70	5,5	158°	
fond	3	220°	12	0	15,3	251°	
7	0	14		116°	10	8,6	252°
	10	9,9		108°	20	8	262°
	20	9,5		104°	30	8,3	285°
	30	8,7		110°	40	?	?
	40	?		?	50	6	345°
	50	9,6		100°	60	4	250°
	60	8	81°				
70	4,6	225°					

Date : 8 oct. 1969.

Météo. : vent, $V_{\text{moy.}} = 2,4 \text{ m/s}$ de secteur alternant de N.E. à W.

pression = 1 015 millibars

Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
22	0	10,8	71°	12	0	17	345°
	10	5,8	103°		10	10,5	150°
	20	4,5	55°		20	7,5	253°
16	0	6,8	235°		30	9	277°
	10	6,2	170°		40	8	265°
	20	7	132°		50	11,5	218°
	30	4,5	125°	60	?	?	
20	0	6,6	118°	13	0	23,2	153°
	10	8,7	82°		10	19,5	150°
15	0	7	183°		20	16,8	142°
	10	5,3	260°		30	16,8	137°
	20	4	216°		40	19	140°
14	0	12,5	236°		50	19,5	145°
	10	9,3	225°		60	14,8	120°
	20	?	?		70	4,6	263°
	30	8,6	230°	80	6,5	303°	
18	40	4,5	190°	18	0	11,2	50°
					10	6,8	80°
					20	5,6	65°
				30	4,5	60°	

Date : 25 nov. 1969								
Météo. : vent $V_{\text{moy.}} = 3 \text{ m/s}$ alternant de secteur E.N.E. à N.W.								
retour au calme en fin de dépression de 991 m. bar.								
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	
2	0	13,5	48°	6	0	15,5	214°	
	10	10,4	58°		10	14	229°	
	20	11	64°		20	12,2	235°	
	30	9	61°		30	11,7	238°	
	40	10,9	62°		40	10,5	252°	
	50	9,1	239°		50	11	222°	
	60	9,4	215°		60	9,4	211°	
	fond	5,2	225°		fond	3,5	200°	
3	0	10	318°	7	0	14	23°	
	10	8,1	301°		10	12,8	26°	
	20	9,2	335°		20	12,2	50°	
	30	8,7	345°		30	10,1	53°	
	40	9,4	318°		40	8,1	213°	
	50	10,2	355°		50	10,8	266°	
fond	9,2	336°	60	13,8	297°			
4	0	12,7	89°	8	70	11,1	277°	
	10	12,3	85°		fond	6,5	260°	
	20	15,3	87°		8	0	12,2	5°
	30	11,3	91°			10	7,5	8°
	40	10,8	86°			20	8,3	309°
	50	8,5	61°			30	8,1	42°
	60	7,9	121°			40	7,8	184°
	70	8,6	175°			50	9,2	170°
fond	6,4	185°	60	8		187°		
70	8,6	175°	70	7,3		195°		
5	0	17,6	290°	11	fond	6,1	260°	
	10	14,5	275°		11	0	12,5	26°
	20	16,5	270°			10	12,8	19°
	30	14,5	277°			20	10,6	42°
	40	14,6	283°			30	12,3	50°
	50	13,7	279°			40	11	48°
fond	7,5	276°	50	10,7		55°		
				60	9,2	42°		
				fond	3,2	15°		

Date : 6 fév. 1970							
Météo. : mer belle. Vent faible ou nul, $V_{\text{moy.}} = 1,1$ m/s, de secteur N.E. à S.W.,							
Pression = 1004 m. bar.							
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
23	0	6,6	35°	20	0	11,7	322°
	10	6,7	140°		10	6,3	145°
	20	8,8	155°	15	0	9	174°
	30	6,9	149°		10	10,6	201°
21	0	8,2	300°	20	6,3	226°	
	10	8	286°	14	0	13,6	182°
	20	5,5	35°		10	13,2	215°
22	0	12,2	106°		20	12,7	220°
	10	11,1	120°		30	13,2	219°
	20	10,6	172°	40	?	?	
18	30	4,7	174°	11	0	10,6	15°
	0	12,3	80°		10	16,8	352°
	10	6,2	81°		20	16,1	354°
	-20	9,4	96°		30	?	?
	30	?	?		40	13,3	357°
fond	4,1	145°	50		?	?	
17	0	12,9	252°	60	11,2	348°	
	10	8,2	100°	fond	9	340°	
	20	12,1	81°	12	0	13,7	275°
	30	?	?		10	10,1	264°
	40	9,7	85°		20	10,3	272°
	50	13,7	83°		30	10,2	276°
fond	4,2	75°	40		8,8	9°	
16	0	13,4	140°		50	9,3	23
	10	9,6	125°	60	8,1	7°	
	20	10,9	149°				
	30	10,7	156°				
	fond	3,7	113°				
19	0	14,1	103°				
	10	7,3	176°				
	20	?	?				
	fond	3,4	163°				

Date : 30 oct. 1969.								
Météo. : mistral et tramontane modérés. $V_{\max.} = 7 \text{ m/s}$								
Fin de dépression de 1 006 m. bar.								
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	
3	0	12,5	122°	23	0	13	195°	
	10	8,3	142°		10	7,5	210°	
	20	8,3	105°		20	?	?	
	30	?	?		30	4	128°	
	40	6,8	142°		22	0	13,3	208°
	50	6,3	40°			10	8	239°
fond	4	337°	20	6,3		286°		
4	0	13,7	70°	18	0	10,8	238°	
	10	9,6	40°		10	8,7	232°	
	20	11,7	334°		20	4,7	220°	
	30	12,7	347°	30	3,5	216°		
	40	?	335°	17	0	18,8	195°	
	50	?	12°		10	13	234°	
	60	?	36°		20	11,2	260°	
	70	9,9	29°		30	6,4	266°	
fond	3,8	20°	40		5,7	260°		
5	0	10,1	173°	50	9,1	348°		
	10	6,4	167°	fond	4,8	320°		
	20	5,8	82°	16	0	9,6	202°	
	30	7,7	84°		10	4,5	300°	
	40	8	71°		20	4,9	10°	
50	5,3	276°	30		10,3	36°		
6	0	13,3	225°		fond	6,7	30°	
	10	11,5	249°	14	0	8,6	224°	
	20	9,6	240°		10	6,4	356°	
	30	12,6	235°		20	?	?	
	40	10,8	231°		30	8	60°	
	50	12,1	229°		40	3	351°	
	60	14,2	260°					
fond	?	?						

Date : 9 déc. 1969
Météo. : mistral et tramontane depuis le : 4-XII
 $V_{\text{max.}} = 7 \text{ m/s}$ à l'observatoire.

Raffales de 25 nœuds à Pomègues.
Le 5-XII dépression maximum de 989 m. bar.
et raffales de 40 à 50 nœuds.

Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
23	0	21,4	150°
	10	16,4	162°
	20	11	215°
	30	9,7	36°
21	0	18,5	282°
	10	16,1	292°
	fond	11,1	228°
22	0	18	211°
	10	11,8	210°
	20	11,8	307°
	fond	6,6	330°
17	0	20,7	100°
	10	20,3	88°
	20	10,3	33°
	30	?	?
	40	22,8	270°
	50	?	?
fond	9,7	250°	
16	0	21,5	83°
	10	18,5	91°
	20	14,4	184°
	30	21,9	270°
fond	14,3	277°	
18	0	13,6	95°
	10	8,1	170°
	20	12,7	276°
	30	11,9	229°
fond	6,2	215°	
19	0	20,1	336°
	10	14,5	352°
	20	10,3	22°
15	0	23,6	128°
	10	13,3	133°
	20	10,2	256°
	fond	9,8	321°
$\varphi = 43^{\circ}16'$ 40" N. G = $5^{\circ}19'$ 05" E.	0	17,5	219°
	10	5,4	144°
	20	7	241°
	30	4,7	279°

Date : 28 janv. 1969
Météo. : Vent de secteur E. à S.E. $V_{\text{moy.}} = 3,5 \text{ m/s}$,
 $V_{\text{Max.}} = 9 \text{ m/s}$.

Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
20	0	25	354°
	10	7,5	170°
15	0	18	42°
	10	14,6	32°
	20	10,7	80°
	30	8,6	122°
	fond	17	50°
21	0	13	10°
	10	6,8	35°
19	0	22,2	39°
	10	15	196°
	20	11	120°
	fond	?	70°
Stat. $\varphi : 43^{\circ}14'$ N. G : $5^{\circ}20'$ 45" E.	0	17	32°
	10	10,3	41°
	20	10,8	260°
4	0	19,5	334°
	10	9,5	67°
	20	10,3	270°
	30	7,7	249°
	40	7	226°
	50	9,5	161°
	60	7,2	198°
	70	?	?
fond	5	182°	
9	0	36	340°

Date : 17 oct. 1969.
 Météo. : Vent s'orientant de secteur E. $V_{\text{moy.}} = 3,4 \text{ m/s}$. $V_{\text{max.}} = 9 \text{ m/s}$
 Pression : 1 010 m. bar. Le 19 oct. dépression max. = 1 003 m. bar.

Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	Station	Prof.	Vit.	Direct.
14	0	8	113°	1	0	11,6	44°
	10	6,8	105°		10	8,6	230°
	20	6,2	102°		20	5,5	355°
	30	5,3	68°		30	5	31°
	40	?	?				
15	0	9,5	13°	3	0	15,6	358°
	10	4,9	134°		10	8,5	355°
	20	3,7	61°		20	4,7	304°
					30	4,9	218°
			40		6,4	192°	
			50		6,6	205°	
16	0	12,2	25°	4	0	11,7	107°
	10	6,9	50°		10	11,2	70°
	20	6,2	77°		20	?	?
	30	4,3	87°		30	8	90°
			40		6,6	79°	
			50		3,8	128°	
			60		3,8	200°	
19	0	13,6	320°	5	0	14,3	327°
	10	5,5	14°		10	9,1	222°
	20	4,6	23°		20	6,5	150°
18	0	12,2	309°		30	7,7	180°
	10	8,7	266°		40	?	?
	20	7,1	229°		50	6,8	217°
	30	4,6	212°		60	5,8	215°
20	0	10,2	20°				
	10	4,3	130°				
21	0	10,5	20°				
	10	6,6	138°				
22	0	16,7	339°				
	10	9,4	8°				
	20	7,7	291°				
23	0	14,7	22°				
	10	8,1	15°				
	20	6,3	19°				
	30	4	108°				

Date : 4 mai 1970							
Météo. : Vent de secteur S.E. à S., $V_{\text{moy.}} = 4 \text{ m/s}$, $V_{\text{max.}} = 9 \text{ m/s}$.							
Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.	Station	Prof. m	Vit. cm/s	Direct.
2	0	?	56°	17	0	?	87°
	10	?	113°		10	?	165°
	20	?	210°		20	?	190°
	30	?	335°		30	?	207°
	40	?	35°		40	?	220°
	50	?	225°		50	?	225°
	60	?	217°		fond	?	270°
	fond	?	263°				
1	0	?	9°	14	0	?	31°
	10	?	320°		10	?	92°
	20	?	293°		20	?	186°
	30	?	5°		30	?	251°
	fond	?	353°		fond	?	260°
4	0	16,5	55°	11	0	?	6°
	10	11,5	30°		10	?	13°
	20	12,1	60°		20	?	14°
	30	8,3	19°		30	?	328°
	40	8,3	13°		40	?	285°
	50	6,9	265°		50	?	285°
	60	7,5	245°		60	?	230°
	fond	11,2	240°				
5	0	11,3	340°	12	0	?	291°
	10	7	20°		10	?	319°
	20	6,7	94°		20	?	140°
	30	7,2	114°		30	?	128°
	40	8,9	150°		40	?	138°
	50	10,7	150°		50	?	131°
	fond	4,5	130°		60	?	170°

REFERENCES

- Allain C., 1960. Topographie dynamique et courants généraux dans le bassin occidental de la Méditerranée (golfe du Lion, Mer Catalane, Mer d'Alboran, secteur à l'est de la Corse). *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, 24 (1) : 121-145.
- Aubert M., Aubert J., Daniel S., 1968. Côtes de France : Inventaire national de la pollution bactérienne des eaux littorales. *Rev. int. Océanogr. médicale*, C.E.R.B.O.M. tome 4 : 167 pp.
- Arx W.S. Von, 1962. An introduction to physical oceanography. Addison-Wesley, Pub., Reading and London : 422 pp.
- Blanc J.J., 1958. Houles et vagues (Nord, Nord-Ouest, Ouest) dans la région de Marseille. Influence sur la sédimentation littorale. *Rec. Trav. Sta. marine Endoume*, 23 (Bull. 14) : 123-141.
1969 : Recherches de géodynamique littorale appliquée à la plage du Prado (Marseille). *Théthys*, 1 (4) : 1147-1166.
- Bougis P., Ruivo M., 1954. Un nouveau type de flotteur en matière plastique pour l'étude des courants de surface. *Vie et Milieu*, 4 : 171-176.
1955. Sur l'utilisation des flotteurs en matière plastique (modèle siphonophore) pour l'étude des courants. *Bull. Inf. C.O.E.C.*, 7 (4) : 159-171.
- Bougis P., 1958. Contribution à la connaissance des courants superficiels dans le nord-ouest de la Méditerranée occidentale. *Comm. int. Explor. Sci. Méditerranée, Rapp. et P.V.*, 14 ns : 67-84.
- Castelbon C., 1971. Description d'une bouée assurant automatiquement la descente par palier d'un courantographe. *Cah. Océanogr.* (23 (2) : 135-144.
- Devèze L., 1954. Cycle biologique des eaux et écologie des populations planctoniques. *Rec. Trav. Sta. marine Endoume*, 25 : 220 pp.
- Duboul-Razavet C., 1958. Sur quelques lancers de cartes siphonophores et de bidons lestés au large de la baie de Marseille. *Bull. Inst. Océanogr. Monaco*, n° 1 132.
- Furnestin J., 1960. Hydrologie de la Méditerranée occidentale (golfe du Lion, Mer Catalane, Mer d'Alboran, Corse orientale), 14 juin-20 juillet 1957. *Rev. Trav. Inst. Pêches marit.*, 24 (1) : 5-119.
- Gaudy R., 1962. Biologie des copépodes pélagiques du golfe de Marseille. *Rec. Trav. Stat. marine Endoume*, 27 (Bull. 42) : 93-184.
- Gautier Y., 1956. Sur quelques lâchers de cartes du type "siphonophore" en vue de l'étude des courants de surface devant le delta du Rhône. *Bull. Inform. C.O.E.C.*, 8 (6) : 274-282.
- Hentsch J.M., 1962. Etude des courants dans la baie de Villefranche. *Trav. Centre Rech. Et. Océanogr.*, 4 (4) : 19-42.
- Idrac P., 1933. Influence du vent d'Est et du mistral sur la température des couches sous-marines sur la côte d'azur. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 197 : 1 680-1 681.
- Jacquotte R., 1963. Signification biocoenotique des fonds à *Peyssonnelia polymorpha* (Zan.) Schmitz des côtes de Provence (de la baie de Marseille aux îles d'Hyères). *Rec. Trav. Sta. marine Endoume*, 44 (Bull. 29).
- Laborel J., Pérès J.M., Picard J., Vacelet J., 1961. Etude directe des fonds des parages de Marseille de 30 à 300 mètres avec la soucoupe plongeante Cousteau. *Bull. Inst. Océanogr. Monaco*, n° 1 206.
- Lacombe H., Tchernia P., 1960. Quelques traits généraux de l'hydrologie méditerranéenne. (D'après diverses campagnes hydrologiques récentes en Méditerranée, dans le proche Atlantique et dans le détroit de Gibraltar). *Cah. Océanogr.* 12 (8) : 527-547.
- Lacombe H., 1954. Contribution à l'étude de la Méditerranée occidentale. Aperçu dynamique. *Bull. Inform. C.O.E.C.*, 6 (1) :
- Lee A.J., Bumpus D.F., Lauzier L.M., 1965. "Le dériveur de fond", nouveau modèle de matériel dérivant sous l'influence des courants près du fond. *Cah. Océanogr.*, 17 (2) : 123.
- Le Floch J., Romanovsky V., 1954. Circulation superficielle des eaux dans la partie orientale du bassin occidental de la Méditerranée. *Trav. Centre Rech. Et. Océanogr.*, (6).
- Le Floch J., 1963. Sur les variations saisonnières de la circulation superficielle dans le secteur Nord-Est de la Méditerranée occidentale. *Ibid.*, 5 (1) : 5-10.

- Le Pichon X.**, 1963. La couche superficielle de la Méditerranée au large des côtes provençales durant les mois d'été. *Cah. Océanogr.*, 15 (5) : 299-314.
- Minas H.J.**, 1963. Contribution préliminaire à l'étude hydrologique et hydrochimique du Golfe de Marseille. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume*, 28 (Bull. 43) : 3-16.
1968. Recherches sur la production organique primaire dans le bassin méditerranéen nord-occidental. Rapports avec les phénomènes hydrologiques. Thèse présentée à la faculté des sciences de l'université d'Aix-Marseille.
1968. A propos d'une remontée d'eaux profondes dans les parages du golfe de Marseille. *Cah. Océanogr.*, 20 (8) : 647-672.
- Neumann G.**, 1968. Ocean currents. Amsterdam, London, New-York, Elsevier : 351 pp.
- Nielsen J.N'**, 1912. Hydrography of Mediterranean and adjacent seas. *Rept. Danish Oceanogr. Exp. 1908-1910*, Vol. 1 : 77-192.
- Pérès J.M., Picard J.**, 1955a. Observations biologiques effectuées au large de Toulon avec le Bathyscaphe F.N.R.S. III de la Marine Nationale. *Bull. Inst. Océanogr. Monaco*, n° 1 061.
1964. Nouveau manuel de bionomie benthique de la mer Méditerranée. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume*, 47 (Bull. 31).
- Picard J.**, 1961. Distribution et particularités des peuplements benthiques des côtes de Provence entre le Bec de l'Aigle et l'île des Embiez. *Ext. rap. et P.V. réu. de la C.I.E.S.M.M.*, 16 (2) : 425-427.
- Platania** 1923. Experiments with drift bottles (2nd Report) *Rept. Dan. Oceanogr. Exp. 1908-1910*, n° 7.
- Romanovsky V.**, 1950. Les remontées des eaux profondes dans la baie de Villefranche. *Cah. Centre Rech. Et. Océanogr.* n° 2 : 7 pp.
1952. Etude de la circulation littorale dans la baie de Nice. *Bull. Inform. C.O.E.C.*, 4 (5) : 181-193.
- 1955a. Résultats de la détermination dans le bassin occidental de la Méditerranée des courants superficiels par la méthode des flotteurs dérivants. *Trav. Centre Rech. Et. Océanogr.*, 2 (1-2).
- 1955b. Etude de la circulation littorale dans le golfe Juan. *Bull. Inform. C.O.E.C.*, 7(3) : 119-126.
- Schmidt J.**, 1913. Experiments with drift bottles (1st Report) *Rep. Dan. Oceanogr. Exp. 1908-1910*, n° 2.
- Smyth W.H.**, 1854. The Mediterranean. A memoir, physical, historical and nautical. London.
- Tchernia P., Lacombe H.**, 1956. Contribution à l'étude de la Méditerranée occidentale. Deuxième mémoire préliminaire. Hydrologie et aperçu dynamique. *Cah. Océanogr.*, 8 (9) : 427-463.
- Thoulet M.J.**, 1896. Océanographie. (Dynamique). Librairie militaire L. Baudoin. Paris : 131 pp.
- Travers A., Travers M.**, 1962. Etude qualitative et quantitative des populations phytoplanctoniques du Golfe de Marseille. *Rec. Trav. Sta. mar. Endoume*, 26 (Bull. 41) : 7-139.
- Travers M.**, 1971. Le microplancton du golfe de Marseille : études qualitatives structurales et synécologiques, variations spatio temporelles. Thèse présentée devant l'université d'Aix-Marseille.
- U.N.E.S.C.O.**, 1963. Fixed oceanographic stations of the world. Intergovernmental oceanographic commission : 76 pp.
1967. An intercomparison of some current meters. Unesco technical papers in marine science, n° 11 : 70 pp.
- Vayssière A.**, 1920. Etude de la faune marine de la côte occidentale du golfe de Marseille (région de Carry). *Ann. Mus. Hist. Nat. de Marseille*, 17 : 95-110.
- Zöppritz**, 1878. Zur théorie der Meeresströmungen, Wiedemanns Annalen der Phys. III, 582, f. und Ann. der Hydrographie. 1878, 239.