

République Tunisienne

ISSN 0330-0080

BULLETIN DE L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LA MER



I N S T M

Volume N°23, II 1996

République Tunisienne

ISSN 0330-0080

BULLETIN DE L'INSTITUT NATIONAL
DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LA MER

Volume N°23, II 1996

SOMMAIRE

| | |
|--|-----|
| Hydrodynamique de la région Nord - Tunisie/Sicile/Sardaigne durant le printemps 1995 - Chérif SAMMARI & BRAHIM, M. | 5 |
| Elevage intensif du loup <i>dicentrarchus labrax</i> et de la daurade <i>sparus aurata</i> nourris avec des aliments semi-humides expérimentaux - Raouf BESBES & GURBEJ, H. | 33 |
| Etude des performances du loup d'écloserie <i>dicentrarchus labrax</i> en grossissement intensif nourri avec un aliment semi-humide - Hamadi GUERBEJ | 45 |
| Cartographie des peuplements de la macroalgue <i>Gracilaria</i> (Gigartinales, Gracilaires) dans le lac nord de Tunis - Jamel KSOURI; BEN SAÏD, R. & BEJI, O. | 55 |
| Impact du phosphogypse et des rejets urbains sur la bioaccumulation en métaux traces par la palourde <i>ruditapes decussatus</i> prélevée dans la région de Sfax - Najoua TRIGUI EL MENIF; LE PENNEC, M.; MAAMOURI, F. & MEDHIOUB, K. | 73 |
| Lagune de Boughrara : Bilan d'une année de surveillance hydrobiologique Mouldi BRAHIM, MASTOURI, A. & AKROUT, | 83 |
| Bilan de la pêche dans le lac sud de Tunis (1988-1993) - Abderrazak MASTOURI & BEN MERIEM, S. | 107 |
| Etude hydrobiologique au large des îles Kerkennah - Abderrazak MASTOURI; CHOUBA, L. & EL ABED, A. | 128 |
| Etude de la contamination des écosystèmes du large des îles Kerkennah par les métaux lourds (Cd, Pb, Cu et Hg) - Lassâad CHOUBA; MASTOURI, A. & EL ABED, A. | 139 |

HYDRODYNAMIQUE DE LA REGION NORD-TUNISIE/SICILE/SARDAIGNE DURANT LE PRINTEMPS 1995

Chérif SAMMARI et Mouldi BRAHIM

INSTM - Salammbô - TUNISIE

ملخص

الخصائص الهيدرولوجية والديناميكية للمنطقة المتواجدة بين السواحل الشمالية لتونس و سيشيليا و سرديانيا وقعت دراستها على ضوء المعطيات و النتائج العلمية المتحصل عليها من أفريل إلى جوان 1995 تبين لنا مدى تغير اتجاه سيلان المياه في فترة متوسطة في هذا القطب البحري و أن أحسن دليل وجود دوّاران في قنال سرديانيا ذو وجهتين مختلفتين ووجود تعاريج في قنال سيشيليا.

كما بينت هذه الدراسة إلى وجود عرق من المياه الباردة و الثقيلة في جنوب غربي قنال سيشيليا و المتأتية تقريبا من البحر اليوناني « Ionienne » كان أحسن دليل على أن هذه المياه قارة و التي تم ذكرها من قبل من طرف بعض الباحثين. لقد أثبتنا أن بعض مياه الأطللس التي غيرت مجراها من جراء بنك الإسكركيس تلتحق بمياه الأطللس الأخرى و تسير على طول الشريط الساحلي بشمال تونس و البعض الآخر من مياه الأطللس تصل إلى قنال سيشيليا بعد أن تخلطت بمياه أكثر ملوحة في جنوب غربي سيشيليا.

إتضح لنا وجود مياه الشتاء الباردة في عمق أربع مائة متر في قنال سرديانيا ولكننا لم نستطع على إثر هذه المعطيات أن نبين مدى تطوّر هذه المياه في الزمان و المكان حتى يتسنى لنا أن نفهم هذا التحرك في وقت قصير. في نفس هذا القنال تبين لنا وجود مياه عميقة و التي لها أخصية هيدرولوجية مختلفة من المياه العميقة المتواجدة بغربي البحر الأبيض المتوسط بمياه البحر التريبي « Tyrrhénienne » ممكنة.

أخيرا لقد عرضنا تقديرا لتيار المياه في قنال سرديانيا و قنال سيشيليا.

Résumé

Les particularités hydrologiques et dynamiques qui ont prévalu dans la région Nord-Tunisie/Sicile/Sardaigne (T2S) sont décrites à la lumière des données hydrologiques collectées durant la période avril - juin 1995. L'intense activité à moyenne échelle qui caractérise cette région est mise en évidence. La détection de deux tourbillons dans le canal de Sardaigne (un anticyclonique au Sud et un cyclonique au Nord) et des méandres dans le canal de Sicile en sont une remarquable preuve. L'existence d'une veine d'eau froide et dense ($\theta = 13.70$ °C et $\sigma_\theta = 29.15$), probablement issue de la mer Ionienne, collée à la partie sud-ouest du canal de Sicile, constitue une autre observation fondamentale et confirme la permanence de cette structure dont l'existence a été déjà mentionnée par d'autres auteurs. Nous avons également montré qu'une partie de l'eau atlantique qui est partiellement déviée par les hauts fonds des bancs des Esquerquis rejoint la veine qui longe

juste après avoir contourné ces hauts fonds. Une autre partie atteint la canal de Sicile après s'être mélangée avec de l'eau plus salée au sud ouest de la Sicile.

Dans le canal de Sardaigne nous avons détecté la présence de l'eau d'hiver fraîche à 400 mètres d'immersion. Cependant, le suivi de l'évolution spatiale et temporelle de cette eau d'hiver n'a pu être correctement établi par nos données confirmant ainsi la nécessité d'avoir une résolution spatio-temporelle plus fine, susceptible d'appréhender des structures de plus petite échelle. Dans ce même canal, nous avons observé à 1300 m l'existence d'une profonde dont les caractéristiques hydrologiques (salinité et température) diffèrent de l'eau profonde ouest méditerranéenne (WMDW); ces différences permettent de suspecter un mélange de la WMDW et de l'eau profonde Tyrrhénienne (DTW).

Enfin des estimations de flux dans les canaux de Sardaigne et de Sicile sont proposées et leur concordance commentée.

Mots clé : Mer Méditerranée, hydrologie, dynamique, variabilité, flux

words Key : Mediterranean sea, hydrology, dynamic, variability, flux

I - INTRODUCTION

La région T2S délimitée par le canal de Sardaigne à l'ouest, la Mer Tyrrhénienne au nord et le canal de Sicile à l'est occupe une position géographique particulière qui lui confère un rôle océanographique important. Elle forme, en effet, la jonction entre trois sous-ensembles majeurs de la Méditerranée : le bassin Algéro-Provençal à l'ouest, la mer Tyrrhénienne au nord et la Méditerranée orientale à l'est (bassin ionien).

En ce qui concerne le canal de Sicile, il est caractérisé par une bathymétrie complexe, plus particulièrement en raison de la présence de deux seuils principaux aux profondeurs de 365 et 430 m (Frassetto, 1964). Morelli et al., (1975) ont reporté des profondeurs différentes des seuils (410 m pour le seuil ouest et 510 m pour le seuil est). Compte tenu de son rôle fondamental notamment dans le contrôle de la circulation à grande échelle existant entre les bassins ouest et est de la mer Méditerranée, le canal de Sicile a fait l'objet de plusieurs études et investigations qui ont permis de mieux connaître ses particularités hydrologiques et dynamiques. Parmi ces études, nous citons à titre indicatif et non exhaustif les travaux de Wüst (1961), Ovchinnikov (1966), Morel (1972), Garzoli et Maillard (1979), Grancini et Michelato (1987), Manzella et al., (1990).

Dans la littérature, le canal Sicile est décrit comme étant un système à deux couches : en surface, de l'eau d'origine atlantique (MAW) y est acheminée par le courant algérien selon des trajectoires plus ou moins diffuses régies par une intense activité à moyenne échelle (Millot, 1987-a), puis s'écoule vers l'est pour entrer dans bassin est ; dans la couche profonde, de l'eau plus salée formée en hiver en Méditerranée orientale (LIW) s'écoule en direction opposée.

Il est à noter que l'image synthétique proposée par Wüst (1961) et Ovchinnikov (1966) de la scission de la MAW en deux branches, l'une s'écoulant vers la Méditerranée orientale et l'autre

pénétrant en Mer Tyrrhénienne, n'est pas tout à fait cohérente avec le schéma de circulation élaboré par Millot (1987-a) dans lequel les structures tourbillonnaires jouent un rôle prépondérant.

L'image hydrologique du canal de Sicile présente également une hétérogénéité spatiale marquée par des *upwelling* au sud de la Sicile ainsi que des méandres pouvant générer des tourbillons de petite taille dans la partie centrale (Manzella *et al.*, 1990; Moretti *et al.*, 1993).

L'estimation des flux demeure assez imprécise et parfois même sujette à controverse puisqu'elle ne fait pas l'unanimité des auteurs. Ainsi, concernant le flux de la MAW, selon Grancini et Michelato (1987) et Manzella *et al.*, (1988), il présente une forte variabilité saisonnière, alors que Budillon *et al.*, (1992) rapportent l'absence de variabilité. A titre indicatif, les estimations extrêmes rapportées dans la littérature varient, pour une même saison, de 0.3 Sv à 1.5 Sv. Ces estimations sont, certes, tributaires de plusieurs facteurs dont la méthode de calcul adoptée et la résolution spatio-temporelle des données hydrologiques qui en sont à l'origine. La forte variabilité interannuelle observée par Budillon *et al.*, (1992) pourrait être également une explication à ces disparités.

En ce qui concerne l'eau levantine intermédiaire (LIW) provenant du bassin oriental, nous savons qu'elle pénètre dans le canal de Sicile suivant un cheminement fortement influencé par la bathymétrie puisque son cheminement vers le bassin ouest se fait au travers des deux seuils. Sa quantification reste également imprécise.

Les différents rapports des flux LIW/MAW rapportés dans la littérature sont : 0.78 selon Molcard (1972), 0.96 d'après Morel (1972), 0.81 selon Garzoli et Maillard (1979) et 0.97 selon Béthoux (1980). Ces estimations, basées le plus souvent sur des bilans de sel, sont certes entachées d'erreurs dont la quantification est difficile à cause essentiellement de l'incertitude relative au flux d'évaporation. Si par contre, nous considérons qu'elles sont correctes, nous pouvons émettre l'hypothèse selon laquelle aussi bien le flux que les caractéristiques des masses d'eau dans le canal de Sicile sont sujets à une variabilité interannuelle.

Les rares travaux sur le canal de Sardaigne sont ceux de Garzoli et Maillard (1979) qui ont rapporté la présence de deux tourbillons et émis l'hypothèse selon laquelle la LIW se scinde en deux branches au sud de la Sardaigne, l'une parallèle aux côtes nord-africaines et s'écoulant vers l'Ouest, l'autre à la côte Est Sarde et s'écoulant vers le Nord.

Les travaux de Benzohra et Millot (1994) suggère qu'une partie de LIW coule vers l'est le long du talus algérien, ce qui contredit les observations de Garzoli et Maillard. Des travaux plus récents (Roussenov, 1975) mentionne la séparation de la LIW en trois branches : l'une s'écoule vers la Mer Tyrrhénienne, une autre le long des côtes ouest de la Sardaigne et une troisième s'acheminant directement vers le canal de Sardaigne. Ces rares travaux mettent en évidence la complexité du cheminement de la LIW dans le bassin ouest.

Selon Garzoli et Maillard (1979), les flux superficiel et intermédiaire, en période hivernale, calculés le long du méridien 09°30'E, sont respectivement 0.72 Sv vers l'est et 0.92 Sv vers l'ouest.

Nous proposons dans ce document une description des conditions hydrologiques et dynamiques de **T2S** à la lumière de données hydrologiques collectées durant le printemps 1995, dans le cadre du projet SALTO/AVICENNE dont la finalité est de mieux cerner la variabilité spatio-temporelle qui régit cette région.

II - LES DONNEES

La stratégie d'échantillonnage adoptée durant les campagnes du printemps 1995 privilégie l'étude de la variabilité à moyenne échelle, et plus particulièrement celle des flux à travers les canaux de Sardaigne et de Sicile. Ainsi, des stations espacées respectivement de 10 et 5 milles nautiques ($<$ au du rayon interne de déformation) ont été échantillonnées sur les radiales SA et SI avec une fréquence bimensuelle (fig. 1). La radiale CT reliant les deux stations extrêmes de SA et SI et traversant les bancs des Esquerquis a été explorée seulement le 12 juin. La radiale SI est alignée sur l'axe Cap Bon-Marsala qui constitue le passage le plus étroit du détroit (70 milles nautiques). Au total, 73 stations ont été réalisées en cinq campagnes (24 avril, 17 et 25 mai, 12 et 28 juin), dont certaines à une proximité des côtes tunisiennes encore jamais atteinte.

Les données ont été acquises avec une bathysonde *SBE 911* récemment acquise et dont les capteurs ont été plus calibrés, chez le constructeur, avant le début de la première campagne. Ses caractéristiques approchent ou dépassent les normes océanographiques mondiales (JGOFS ou NOCE). Ainsi l'exactitude des mesures telle que certifiée par le constructeur est de 0.004°C pour la température et 0.003 pour la salinité.

III - CANAL DE SICILE

Hydrologie

Dans le canal de Sicile, l'eau atlantique modifiée (MAW), reconnaissable par ses faibles valeurs de salinité ($S < 37.50$), occupe toute radiale soit la moitié du canal avec une épaisseur plus grande du côté Tunisien (fig. 2a-d).

Durant les campagnes du mois de mai (fig. 2b-c), nous observons entre les stations 1 et 3 une forte inclinaison et grande immersion des isohalines 37.20-37.70 (à titre indicatif, l'immersion de l'isohaline 37.50 au niveau de la station 1 est supérieure à 100 m). Entre les stations 4 et 7, l'immersion de l'isohaline 37.50 n'a pas changé entre le 17 et le 24 mai et est de l'ordre de 70-80 m. Il y a donc un fort gradient horizontal de salinité durant le mois de mai rattaché aux inclinaison des isohalines inférieurs à 37.70. Ainsi, à la profondeur de 50 m, la salinité à la station 1 est inférieure à 37.20 alors que de la station 5 à 7, elle est de l'ordre de 37.40. Ce gradient est relié à la présence d'une veine principale de la MAW aux alentours du Cap Bon.

Une autre particularité des coupes de salinités relatives au mois de mai est la présence dans la couche de surface de valeurs aussi faibles que 37.08 le 25 mai (fig. 2c) et ce sur une profondeur de 50 m. L'absence d'une signature similaire le 17 mai (fig. 2b), à peine à 10 jours d'intervalle, indique que l'écoulement de la veine de la MAW qui longe les côtes tunisiennes est sujet à des impulsions.

La situation de moi de juin est différente (fig. 2d), puisque *la veine de la MAW aux alentours du Cap Bon* n'est pas observée et la salinité observée à 50 m à la station 1 est de l'ordre de 37.30. En revanche, entre les stations 6 et 7 l'immersion de l'isohaline 37.40 est la même que celle observée en

mai. La situation du 24 avril, date à laquelle seulement 5 stations ont été réalisées sur la radiale se rapproche de celle du 12 juin.

De la distribution de la salinité ci-dessus décrite, nous pouvons déduire que le cheminement de la MAW se fait *via* deux parcours différents : une première veine principale longeant les côtes tunisiennes et contournant le Cap Bon et est sujette à une variabilité à moyenne échelle assez intense et une deuxième secondaire vraisemblablement plus stable présente surtout au delà de la station 5. Cette deuxième veine plus salée provient certainement de la partie de la MAW qui a été partiellement déviée vers le nord par les hauts fonds des bancs d'Esquerquis. Elle se mélange ainsi aux eaux plus salées au sud ouest de la Sicile, zone plus affectée par le passage de la LIW et surtout par les *upwelling* favorisant les mélanges (Manzella *et al.*, 1990, Astraldi *et al.*, 1996), et s'écoule ensuite vers le sud est.

Entre la MAW et la LIW se trouve une couche de transition dont l'épaisseur est de l'ordre de 100 mètres durant le mois de mai et seulement 50 mètres le 12 juin.

Contrainte par la bathymétrie, la majeure partie de l'eau levantine intermédiaire emprunte le passage menant aux seuils du canal de Sicile. Bien que n'ayant pas couvert la totalité du canal, la signature de la LIW ($S = 38.50$, $\theta = 14.20^\circ\text{C}$) est présente durant toutes les campagnes, et le cœur de la veine ($S = 38.74$ et $\theta = 13.90^\circ\text{C}$) est situé entre les stations 4 et 6 (fig. 2b-c). Son épaisseur est de l'ordre de 200 mètres, entre 200 et 400 mètres de profondeur.

Le diagramme θ - S de la station 5 dans le canal de Sicile (bien concernée par la LIW) met en évidence une variabilité des caractéristiques hydrologiques de la LIW (fig. 3). Cette même figure met aussi en évidence la particularité de la situation du 12 juin (température plus faible au niveau de la couche de transition) comparativement aux autres dates.

Sur toutes les coupes de températures (nous présentons ici celles du 25 mai et du 12 juin; figs. 4a-b), nous observons la présence d'une veine d'eau froide et dense ($\theta = 13.65^\circ\text{C}$, $S = 38.73$ et $\sigma_\theta = 29.15$) collée sur le bord tunisien de la faille et dont l'épaisseur est de l'ordre de 75 mètres. Cette veine apparaît également des données historiques (Guibout, 1987) et a été observée par Astraldi *et al.*, (1996). Elle peut donc être considérée comme étant permanente. Nous nous sommes interrogés sur l'origine de cette veine dont la salinité est du même ordre que celle de la LIW mais plus froide et donc plus dense. A notre avis, cette eau pourrait provenir soit de i) l'Adriatique où selon Lacombe et Tchernia (1972), l'eau d'hiver adriatique s'écoule en mer Ionienne, se mélangeant avec de la LIW et donne naissance à une très importante masse d'eau homogène qui est l'eau profonde de la Méditerranée orientale ($\theta = 13.30^\circ\text{C}$, $S = 38.65$ et $\sigma_\theta = 29.17$) ; soit ii) de la mer d'Egée où selon Roether *et al.*, (1996) se forme l'eau la plus dense en Méditerranée orientale. Cependant, les mécanismes dynamiques qui permettraient de mieux appréhender ce cheminement restent à élucider d'autant plus que le seuil de Malte ne permet en principe pas le passage d'eau aussi dense.

La campagne du 12 juin met en évidence une situation hydrologique radicalement différente des autres dates. En effet, les isohalines (fig. 2d) et les isopycnes (fig. 5) présentent une inversion des

pentés à la limite de la station 3. Cette légère concavité des isolignes moins visibles sur les isothermes est, à notre avis, attribuable aux méandres du canal de Sicile. La signature de ces méandres sur la dynamique est assez nette (*cf.* paragraphe suivant).

Dynamique

Bien que tributaires des aléas de la méthode dynamique et plus particulièrement du choix du niveau de référence et des fortes contraintes topographiques, nous avons calculé le courant géostrophique en choisissant comme niveau de référence l'immersion de l'isohaline 38.50. Cette isohaline est généralement peu inclinée et se situe à la limite inférieure de la couche de transition, nous permettant ainsi d'espérer une estimation assez réaliste des flux de surface.

Sur les figures 6a-c, nous observons une forte inclinaison et une importante immersion des isotaches mettant ainsi en évidence l'existence d'une veine collée aux côtes tunisiennes. Cette veine se caractérise par de fortes vitesses en surface (30 cm.s^{-1}), une largeur de 40 km et une grande extension verticale (l'isotache 10 cm.s^{-1} est à 100 m).

La présence d'un courant dirigé vers le nord ouest dans la partie centrale du canal est assez nette, notamment le 17 mai (fig. 6a) date à laquelle la largeur de la veine circulant vers le Nord-Ouest est de l'ordre 10 kilomètres avec des maxima de 16 cm.s^{-1} , en surface.

Comme mentionné plus haut, la situation hydrologique du 12 juin est différente : la coupe verticale du courant géostrophique (fig. 6c) confirme la signature d'un méandre, puisque nous y observons un courant dirigé vers le Nord-Ouest aux alentours du Cap Bon (entre les stations 2 et 4, c'est-à-dire là où conformément à la dynamique géostrophique, le courant doit être dirigé vers le Sud-Est) et un courant dirigé vers le Sud-Est entre les stations 4 et 6.

Il convient de signaler que la détermination précise de l'extension spatiale de la veine circulant vers le Nord-Ouest le 17 mai, le suivi des impulsions de la MAW ou encore des méandres nous amène à nous interroger sur l'efficacité de notre résolution spatio-temporelle et plus précisément sur sa capacité à appréhender des petites structures susceptibles de se manifester dans le canal de Sicile. Vraisemblablement, une résolution plus fine serait d'une grande utilité pour mieux résoudre des échelles de variabilité plus petite que celle que notre réseau permet d'élucider.

Nous avons également estimé les flux superficiels pour les campagnes du 24 avril, 17 et 24 mai et 12 juin. Les valeurs trouvées sont respectivement 0.3, 0.9, 0.8 et 0.45 Sv. Il convient de noter que le flux calculé n'est qu'une partie du flux total de la MAW qui transite par le canal de Sicile ; même s'il y a lieu de penser que conformément à la dynamique géostrophique, cette part est la plus importante et sa variabilité reflète bien celle du flux total. De ces estimations de flux, nous retenons la stationnarité du flux durant le mois de mai et la faible valeur du flux du mois d'avril, et à un degré moindre celle du flux du mois de juin. Certes, dans l'estimation du flux du 24 avril, nous n'avons pas pris en considération l'estimation entre les stations 5 et 6 puisque la radiale du 24 contient 5 stations

seulement, mais cela n'explique pas à lui seul la faible valeur qui à notre avis peut être due aux méandres. En effet, des mesures directes de courant obtenues au voisinage de la station 5 durant la même période (Gasparini, communication personnelle) montrent de faibles valeurs de vitesse et surtout de nombreuses inversions de courant.

Sur les profils verticaux du courant géostrophiques en date du 24 avril qui ne sont pas présentés dans ce texte, nous remarquons qu'entre les stations 3 et 4, le courant en surface est dirigé vers le Nord-Ouest alors qu'entre 4 et 5, il est orienté vers le SE (situation analogue à celle du 12 juin).

IV - CANAL DE SARDAIGNE

Hydrologie

Couche de surface

Si nous considérons comme limite de la MAW l'isohaline $S = 37.50$, nous constatons qu'au cours des deux campagnes du mois de mai (fig. 7a-b), cette isohaline intercepte la surface à 50 km des côtes et se situe à 100 m de profondeur au voisinage de la station 2 (fig. 7a). La pente et l'immersion des isohalines sont importantes, suggérant ainsi un courant côtier assez intense.

Au-delà de la station 4 (*i.e* à 60 km des côtes), la salinité superficielle est supérieure à 38.00. Dans la partie centrale du canal (les 80 km les plus au nord de la radiale), la couche superficielle est très homogène aussi bien en salinité (38.20 en surface et 38.40 à 200m) qu'en température (environ 13.60 sous la thermocline). Les fortes valeurs de salinité permettent d'affirmer qu'il n'y a pas dans cette zone de MAW fraîche, c'est-à-dire en provenance directe du détroit de Gibraltar. Cette situation est à rapprocher des observations de Hopkins (1988) pour qui une salinité supérieure à 38.00 indique une eau soit ancienne, soit totalement mixée. Cette eau pourrait provenir de la partie de la MAW ayant recirculée en mer Tyrrhénienne. En effet, selon Astraldi et Gasparini (1994) le passage de la MAW dans la zone de mélange vertical actif au nord est de la Sardaigne lui permet d'atteindre de telles valeurs de salinité.

La situation hydrologique du 12 juin est radicalement différente (fig. 7c), puisque la MAW relativement récente s'étend sur quasiment toute la radiale (l'isohaline 37.50 intercepte la surface à 90 km des côtes). Globalement, l'extension horizontale de la MAW a donc quasiment doublé. En revanche, l'épaisseur moyenne de la couche a légèrement diminué (70 m). La salinité superficielle de la couche est faible (l'isohaline 37.20 est à 50 m d'immersion). La thermocline est installée, avec des isothermes superficiels plats et parallèles.

L'analyse des caractéristiques hydrologiques et plus particulièrement la salinité de la couche de surface dans le canal de Sardaigne met donc en évidence leur variabilité à moyenne échelle, à en juger par l'extension horizontale de l'eau typiquement atlantique au large des côtes tunisiennes.

Entre le 12 et le 28 juin, la situation a encore changé et même si la couche d'eau atlantique semble également s'étendre sur toute la radiale, nous notons une particularité au niveau de la station 4. La salinité superficielle y vaut 37.89, et nous observons une remontée en forme de dôme des isohalines

puis une concavité (fig. 7d). Cette forme est particulièrement nette sur la coupe de densité (fig. 8) sur laquelle nous observons une double convexité, centrée à la station 2, et une autre double concavité centrée à la station 3. Il y a donc deux tourbillons un anticyclonique au Sud et un cyclonique au Nord. Cette observation est à rapprocher de celle rapportée par Garzoli et Maillard (1979) et nous amène à nous interroger sur la permanence de ces structures et surtout sur leur incidence sur le cheminement de la LIW dans le bassin ouest et plus précisément sur sa scission en deux branches. En effet, l'existence de pareilles structures supporte aisément la scission de la LIW en deux branches.

Couche intermédiaire

La LIW se caractérise par des maxima relatifs de salinité et de température potentielle. La veine elle-même est relativement étendue : son coeur a une salinité de 38.65-38.66, une température potentielle de 13.80°C, une densité potentielle de 29.07-29.08 et elle est centrée à environ 450 m d'immersion au niveau des stations 7 et 8 de la campagne du 17 mai (fig. 7a). Notons que c'est la seule campagne qui permet d'appréhender la veine dans son ensemble, puisque cette dernière, bien que très étendue (l'isohaline 38.60 englobe une épaisseur de 400 m), se trouve plutôt centrée du côté sarde, conformément au schéma de Millot (1987-b) selon lequel la LIW présente dans le canal de Sardaigne a suivi une circulation cyclonique dans la mer Tyrrhénienne et contourne les côtes sardes dans le sens des aiguilles d'une montre. Cette circulation explique l'altération des caractéristiques hydrologiques par rapport au canal de Sicile (où le coeur de la veine a une salinité de 38.74-38.75).

Le diagramme θ -S de la station 5 (fig. 9) montre que les caractéristiques hydrologiques de la LIW ne présente pas une variabilité significative puisque nous ne n'avons pas distingué de différences hydrologiques notables entre les différentes campagnes.

Toutes les coupes de température potentielle révèlent la présence d'une eau plus froide et moins salée que la LIW, collée au fond du côté Tunisien au niveau de la station 5 (à 450-500 m, fig. 10a-d). Sa signature en température est davantage marquée qu'en salinité : $\theta = 13.10^\circ\text{C}$ et $S = 38.50$ pour le coeur de la veine. Nous constatons une très grande différence avec les caractéristiques hydrologiques de la LIW. Toutefois, en ce qui concerne la densité, le déficit en salinité est compensé par la température plus basse, ce qui fait que cette veine a une densité potentielle très proche de celle de la LIW (pas de point de discontinuité sur le diagramme θ -S, fig. 9). L'extension spatiale de cette veine d'eau froide et moins salée que la LIW ainsi que ses caractéristiques hydrologiques semblent évoluer d'une campagne à une autres. Ainsi le 17 mai (fig. 10a), le coeur de la veine se trouve entre la station 4 et 5, avec $\theta = 13.05^\circ\text{C}$ et $S = 38.49$ au fond à la station 5. De plus, si nous délimitons la veine par l'isotherme 13.40°C, nous constatons qu'elle s'étend sur une épaisseur d'environ 100 mètres entre les stations 3 et 5 ($\theta = 13.20^\circ\text{C}$ et $S = 38.54$ au fond à la station 3), jusqu'à la limite de la veine de la LIW.

Le 24 mai (fig. 10b), nous observons deux sous-veines : une première centrée au niveau du fond de la station 5, et une deuxième se centre plus au sud au fond de la station 3. S'agit-il initialement d'une même veine qui s'est scindée ensuite en deux entre les stations 3 et 5? Nous ne sommes malheureusement pas en mesure de l'affirmer avec les données dont nous disposons actuellement. Notons tout de même que la bathymétrie présente au niveau de la station 3 un "creux" pouvant ainsi empêcher la progression de la veine du sud et la piéger.

Ensuite, nous remarquons que la veine sud conserve des caractéristiques hydrologiques relativement stables ($\theta = 13.20^{\circ}\text{C}$ et $S = 38.54$, le 17 mai ; 13.36°C et 38.57 , le 24 mai ; 13.24°C et 38.54 , le 12 juin ; 13.19°C et 38.53 le 28 juin, densité potentielle constante et égale à $29.08-29.09$), alors que la veine nord, compte tenu de sa densité, est progressivement absorbée par la veine intermédiaire, et a presque disparu le 28 juin (fig. 10d) sous l'effet de l'extension de la LIW.

Pour appréhender l'origine de cette eau froide, nous avons exploité la coupe d'oxygène du 12 juin qui montre que la concentration en oxygène de la veine froide est plus élevée que celle de la LIW. En effet, depuis sa formation dans le bassin levantin, la LIW a beaucoup circulé, et sa concentration en oxygène dissous a donc diminué. Par contre, compte tenu de sa teneur, la veine froide semble être plus récente et tout porte à croire qu'elle est d'origine hivernale. En effet, Selon Benzohra et Millot (1995), dans le bassin algérien se trouve entre la MAW et la LIW de l'eau d'hiver intermédiaire (WIW), qui se forme au nord de la Méditerranée occidentale lors du refroidissement hivernal. Dans la zone de formation, les caractéristiques hydrologiques sont $\theta_{\min} = 12.35^{\circ}\text{C}$ et $S = 38.30$ (Lacombe et Tchernia, 1972). Dans le bassin algérien, la WIW se caractérise par une température potentielle comprise entre 12.65 et 13.30°C . La signature de cette eau est essentiellement thermique. Ainsi, l'observation d'une eau froide et récente à des immersions de l'ordre de 400 m nous permet de supposer que cette veine est de l'eau hivernale fraîche (formée pendant le dernier hiver) amenée depuis le bassin algérien par les structures de moyenne échelle qui régissent une grande partie de la circulation. Ce mode de transport (par des structures tourbillonnaires) explique l'altération des caractéristiques de la veine (réchauffement et augmentation de salinité) par rapport aux observations de Benzohra et Millot (1994), puisqu'il facilite notablement les mélanges verticaux.

Couche profonde

Malheureusement, la campagne du 17 mai est la seule qui permet d'appréhender des immersions supérieures à 600 m, avec des mesures allant jusqu'à 1300 mètres (fig. 7a). Des données de cette radiale, nous constatons la forte salinité de l'eau profonde : $\theta = 13.15^{\circ}\text{C}$, $S = 38.53$ et $\sigma_{\theta} = 29.10$ à 1300 m. Comme nous pouvons le constater sur le diagramme θ - S de la station 7 (fig. 11) La densité est typique des eaux profondes de la Méditerranée occidentale ($29.10 - 29.12$; Millot 1987-b), mais pas la salinité et la température dont les valeurs usuelles sont $38.42 - 38.47$. Le grand écart en salinité entre la veine observée et l'eau profonde ouest méditerranéenne (WMDW) ne peut à notre avis être expliqué par des considérations climatiques [Béthoux, (1990) et Rohling et Bryden, (1992)]. En revanche, nous pensons que cet écart peut être expliqué de trois manières différentes : i)

un mélange entre la WMDW et la LIW ou ii) le transport par des structures tourbillonnaires. En effet, selon Millot (1987-a), la circulation des eaux profondes est supposée faible et sans variabilité saisonnière marquée, étant essentiellement due à l'extension spatiale des tourbillons. D'autant plus que la question de son parcours depuis sa formation dans le Golfe du Lion reste ouverte d'une part, et que la veine de la LIW est très étendue dans le canal de Sardaigne d'autre part (l'isohaline 38.60 est détectée jusqu'à 700 m de profondeur ; la partie inférieure de la couche de LIW a une densité potentielle de 29.09, très proche de celle de l'eau profonde) ou iii) . Le mélange entre l'eau profonde ouest méditerranéenne (WMDW) et l'eau profonde Tyrrhénienne (DTW) déjà suspectée au Sud de la Sardaigne (Hopkins, 1988) pourrait également être une explication et nous semble la plus plausible.

Nous notons également la présence à 800-900 m du côté tunisien d'une eau aux caractéristiques hydrologiques identiques à la veine étudiée dans la partie précédente ($\theta = 13.10-13.20^{\circ}\text{C}$, $S = 38.54$ et teneur en oxygène élevée) c'est-à-dire de la WIW (fig. 7a). Le fait que l'on retrouve la même eau incite à dire que sa présence résulte du même phénomène, c'est-à-dire un transport par une structure tourbillonnaire. Toutefois, les mécanismes qui permettraient à la WIW d'atteindre une telle immersion restent à élucider, puisque les tourbillons du bassin algérien peuvent effectivement arracher des lentilles d'eau d'origine diverse (Millot, 1987a-b) mais ne peuvent *a priori* les relâcher qu'à des immersions similaires à celles d'origine.

Dynamique

Nous utilisons la méthode dynamique pour estimer le flux d'eau atlantique dans le canal de Sardaigne. La radiale n'étant pas suffisamment située à l'ouest pour pouvoir utiliser comme niveau de référence la plus grande profondeur commune, l'hypothèse la plus simple est de faire l'approximation d'un mouvement faible au dessous de la couche de MAW. Globalement, nous trouvons un niveau satisfaisant entre 200 et 250 m selon les différentes campagnes, correspondant à l'isohaline 38.40 - 38.50.

Le 17 mai, la coupe de courant géostrophique (fig. 12a) est cohérente avec les coupes hydrologiques, puisque nous y observons un courant très côtier, s'étendant sur une bande de 55 km de large et sur une épaisseur de 150 m. Les plus grandes vitesses se situent près de la côte, atteignant plus de $40 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$. Nous obtenons un flux de la MAW de l'ordre de 1.1 Sv.

Le 24 mai (fig. 12b), la situation est assez similaire ; le courant est étendu sur une bande un peu plus large de 65 km environ, avec des valeurs maximales de l'ordre de $40 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$; nous obtenons un flux de l'ordre de 1.3 Sv.

Le 12 juin (fig. 12c), comme le suggérait déjà la coupe de salinité, la situation est différente. La veine se situe beaucoup plus au nord, sous la forme d'une bande de 40 à 50 km de large centrée à environ 70 km des côtes tunisiennes. Son épaisseur est plus faible (100 m), ainsi que ses vitesses superficielles ($27 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$). Ces valeurs permettent d'obtenir un flux de l'ordre de 0.6 Sv, c'est-à-dire moitié moins que les estimations du mois de mai .

Pour le calcul dynamique du 28 juin, nous avons choisi la plus grande immersion commune comme niveau de référence après avoir exclu la station 1 qui ne dépasse pas 120 m. Ce choix (300 m) se justifie par l'analyse des coupes qui permettent de penser à la présence d'un tourbillon sur toute la colonne d'eau ; nous pouvons donc nous attendre à ne pas trouver de surface de mouvement faible comme pour les autres campagnes (*i.e* à 200-250 m).

Nous obtenons le profil d'un tourbillon anticyclonique légèrement désaxé (fig. 12d), d'un diamètre d'environ 70 km, centré à 50 km de la côte. Les vitesses sont relativement faibles (10 cm.s^{-1} au coeur du tourbillon), mais leurs valeurs absolues sont probablement faussées par le fait que toute la colonne d'eau étant affectée, la vitesse à 300 m n'est pas nulle. La coupe géostrophique ne permet pas de visualiser la situation à proximité des côtes tunisiennes (la station 1 en est exclue), et l'extrapolation visuelle n'est pas aussi aisée que pour les autres dates. Cependant, la coupe de salinité (fig. 7d) indique une compression horizontale des isohalines vers les côtes (notamment au niveau de la station 1), comme si la structure tourbillonnaire poussait le courant vers la côte en réduisant sa largeur lors de son passage. Nous pouvons donc faire l'hypothèse de l'existence d'un courant côtier probablement assez intense dans une bande très restreinte ($< 30 \text{ km}$).

Le 12 juin, nous avons réalisé une radiale reliant la station 6 de SA à la station 7 de SI. En intégrant ces stations extrêmes, nous obtenons donc une radiale de 10 stations qui traverse les hauts fonds des Bancs d'Esquerquis. La distribution de la salinité le long de cette radiale (fig. 13) montre la présence d'une eau typiquement atlantique ($S < 37.40$) entre les stations 6 et 8, c'est-à-dire au nord du Cap Bon, mettant ainsi en évidence le contour de l'eau atlantique de part et d'autre des Bancs d'Esquerquis.

L'existence d'un minimum relatif de salinité (37.60) entre les stations 1 et 3 est le signe de l'existence d'une veine secondaire qui compte tenu de sa direction (voir paragr. suivant) peut être attribuée à la partie de la MAW ayant recirculée en Mer Tyrrhénienne

Nous avons également calculé le courant géostrophique le long de cette radiale (fig. 14) et mis ainsi en évidence la présence d'une veine de MAW d'une largeur d'environ 40 kilomètres avec des vitesses superficielles de l'ordre de 30 cm.s^{-1} . A partir de cette coupe, nous avons constaté qu'à l'ouest des bancs d'Esquerquis existe un courant dirigé vers le Nord-Est alors qu'à l'est de ces hauts fonds le courant est orienté vers le Sud-Ouest. Et, tout se passe comme si une partie de la MAW qui est dévié par les hauts fonds des Esquerquis les contourne pour rejoindre la veine principale qui reste collée aux côtes tunisiennes. Nous avons estimé le flux atlantique en direction du Nord-Est à environ 0.9 Sv. Toutefois, la position géographique de cette radiale (au sud de la jonction Sicile-Sardaigne) ne permet pas d'affirmer que la totalité de ce flux entre en Mer Tyrrhénienne. Nous pensons qu'une partie non négligeable de ce flux se dirige vers le canal de Sicile, au delà de la station 6 de la radiale SI. Il en ressort donc que la MAW atteint le canal *via* deux chemins distincts : Une veine principale collée aux côtes tunisiennes et une autre s'écoulant au sud ouest de la Sicile après avoir contournée les bancs des Esquerquis par le Nord. Cette conclusion rejoint celle d'Astraldi *et al.*, (1996). Nous

pensons donc que nos valeurs de flux dans le canal de Sicile sont légèrement sous-estimés. Seule donc une couverture totale de la radiale Cap Bon-Marsala permet une estimation plus réaliste du flux et donc de mieux suivre ses variabilités.

V - DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Les campagnes hydrologiques effectuées durant le printemps 1995 et au cours desquelles des stations suffisamment proches des côtes tunisiennes ont été échantillonnées pour la première fois, ont permis de confirmer certaines des caractéristiques hydrologiques de la région déjà citées dans la littérature. Elles ont aussi et surtout mis en évidence certains traits peu ou pas cités, parmi lesquels l'intense variabilité à moyenne échelle de la MAW dans les canaux de Sardaigne et de Sicile. La détection de deux tourbillons dans le canal de Sardaigne (un anticyclonique au Sud et un cyclonique au Nord) constitue une observation fondamentale qui se rapproche de celle déjà rapportée par Garzoli et Maillard (1979). Même si elle faite une fois sur les quatre campagnes réalisées dans le canal de Sardaigne, cette observation nous conduit à nous poser la légitime question concernant la permanence de cette structure tourbillonnaire et surtout sur son incidence sur le cheminement de la LIW dans le bassin ouest. En effet, à l'instar de Garzoli et Maillard (1979), nous pensons que la scission de la LIW en deux branches en est une conséquence directe.

Dans le canal de Sardaigne, nous avons également pu appréhender la variabilité à moyenne échelle de la circulation superficielle. Cette variabilité est davantage quantitative que qualitative : la veine de MAW a des caractéristiques hydrologiques assez stables (nous n'appréhendons pas ici la variabilité saisonnière), mais son extension tant horizontale que verticale est sujette à de nombreuses fluctuations. Dans ce même canal, nous avons détecté la présence de l'eau d'hiver fraîche. Nous avons noté que les caractéristiques hydrologiques ainsi que l'extension spatiale de cette eau semble changer de campagne en campagne sans qu'on puisse pour autant bien décrire son évolution qui visiblement se produit à une échelle inférieure à celle détectable par nos données. Nous avons également détecté une eau profonde dont les caractéristiques hydrologiques diffèrent de celle de l'eau profonde ouest méditerranéenne (WMDW) ce qui, à notre avis, justifie pleinement la suspicion de mélange entre la WMDW et l'eau profonde Tyrrhénienne (DTW).

Dans le canal de Sicile, outre la détection de méandres déjà rapportés dans la littérature nous avons mis en évidence que celui-ci est concernée par deux veines de la MAW une, moins salée, longeant les côtes tunisiennes et sujette à des impulsions et à d'intenses variabilités à moyenne échelle et une deuxième, vraisemblablement plus stable, à en juger par l'évolution de sa salinité, atteignant le canal après avoir été dévié par les hauts fonds des bancs des Esquerquis et longer les côtes ouest de la Sicile. Astraldi et al. (1996) évoquent bien la bifurcation de la MAW introduite par la rive ouest de la Sicile. Compte tenu de la topographie qui caractérise les bancs d'Esquerquis et la région avoisinante (haut fond de 120m, à l'est des Esquerquis), le comportement de la MAW est assez complexe puisque nous avons mis en évidence l'existence d'une veine de la MAW qui rejoint la veine longeant les côtes tunisiennes juste après avoir contourné les hauts fonds. Le reste est certainement

scindée en deux parties une qui entre dans la mer Tyrrhénienne et une deuxième qui atteint le canal après avoir longé les côtes ouest de la Sicile.

L'existence d'une veine d'eau froide et dense ($\theta = 13.65^{\circ}\text{C}$, $S = 38.73$ et $\sigma_{\theta} = 29.15$) collée sur le bord tunisien et dont l'épaisseur est de l'ordre de 75 mètres est visiblement une structure stable puisque déjà rapportée dans Guibout (1987) et Astraldi *et al.*, (1996). Toutefois les mécanismes dynamiques qui générerait sa présence ne sont toujours pas identifiés et le fait qu'elle soit issue de la mer d'Egée *est*, à notre avis, une hypothèse fort probable.

Le nombre insuffisant de campagnes et le fait que nos radiales ne soient pas complètes c'est-à-dire ne couvrent pas la totalité des deux canaux ainsi que l'intense activité à moyenne échelle qui affecte la circulation moyenne rend difficile la discussion de la concordance des flux. Toutefois, nous pouvons noter que durant le mois de mai les flux dans les deux canaux sont relativement importants et ne varient pas (le 17 mai, 1.1 et 0.8 Sv respectivement dans le canal de Sardaigne et de Sicile ; le 24 mai, 1.3 et 0.9 Sv). En revanche, durant la campagne du mois de juin une diminution significative du flux est obtenue aussi bien dans le canal de Sardaigne (0.6 Sv) que dans le canal de Sicile (0.45 Sv). Nous ne disposons pas dans les canaux de Sardaigne et de Sicile de données simultanées pour le 24 avril et le 28 juin et il serait donc hâtif de conclure à une quelconque corrélation. Il convient également de noter que la radiale (CT) réalisée le 12 juin et reliant les deux stations extrêmes des canaux de Sardaigne et de Sicile nous a permis de quantifier un important flux atlantique (0.9 Sv) se dirigeant vers le Nord-Est, valeur supérieure à celle obtenue, à la même date, dans le canal de Sardaigne lui-même. Nous en déduisons donc que l'activité à moyenne échelle qui affecte la circulation moyenne biaise l'estimation de flux et il est fort probable que le flux dans le canal de Sardaigne, le 12 juin, est sous-estimé.

Enfin, il s'avère clairement que notre résolution spatio-temporelle (campagne bimensuelle et distances entre les stations de 5 et 10 milles nautiques, respectivement dans les canaux de Sardaigne et de Sicile) n'est pas tout à fait apte à appréhender toute la moyenne échelle susceptible de se manifester dans cette région et un échantillonnage plus fin serait d'un grand intérêt.

La centaine de stations collectées en 1996 avec un échantillonnage spatiale plus fin et dont certaines couvrent la période hivernale (octobre-décembre), nous permettrait certainement de mieux cerner encore certains des aspects hydrologiques et dynamiques qui prévalent dans la région T2S. Une attention particulière sera accordée aux estimations des flux et à leur concordance.

REMERCIEMENTS

Ce travail est une contribution au projet SALTO que la CEE a partiellement financé dans le cadre de l'Initiative AVICENNE (AVI*-CT93-0003). Nous remercions particulièrement l'Etat Major de la Marine Nationale et l'équipage du *N/o Salammô*, navire support des campagnes hydrologiques.

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Bathymétrie de la région T2S et position des stations hydrologiques.

Figure 2. Sections verticales de la salinité dans le canal de Sicile le 24 avril (a), 17 mai (b), 25 mai (c) et 12 juin (d).

Figure 3. Diagramme θ -S de la station 5 dans le canal de Sicile.

Figure 4. Sections verticales de la température potentielle dans le canal de Sicile le 24 mai (a) et le 12 juin (b).

Figure 5. Section verticale de la densité potentielle dans le canal de Sicile le 12 juin.

Figure 6. Sections verticales du courant géostrophique dans le canal de Sicile le 17 mai (a), 25 mai (b) et 12 juin (c). Les vitesses sont en $m.s^{-1}$ et le signe "-" indique un courant dirigé vers le Sud-Est.

Figure 7. Sections verticales de la salinité dans le canal de Sardaigne le 17 mai (a), 25 mai (b), 12 juin (c) et 28 juin (d).

Figure 8. Section verticale de la densité potentielle dans le canal de Sardaigne le 28 juin.

Figure 9. Diagramme θ -S de la station 5 dans le canal de Sardaigne.

Figure 10. Sections verticales de la température potentielle dans le canal de Sardaigne le 17 mai (a), 25 mai (b), 12 juin (c) et 28 juin (d).

Fig. 11. Diagramme θ -S de la station 7 dans le canal de Sardaigne le 17 mai.

Figure 12. Sections verticales du courant géostrophique dans le canal de Sardaigne le 17 mai (a), 25 mai (b), 12 juin (c) et 28 juin (d). Les vitesses sont en $m.s^{-1}$ et le signe "-" indique un courant dirigé vers l'Est.

Figure 13. Section verticale de la salinité le long de la radiale CT, le 12 juin.

Figure 14. Section verticale du courant géostrophique à travers la radiale CT, le 12 juin. Les vitesses sont en $m.s^{-1}$ et le signe "-" indique un courant dirigé vers le Sud-Ouest.

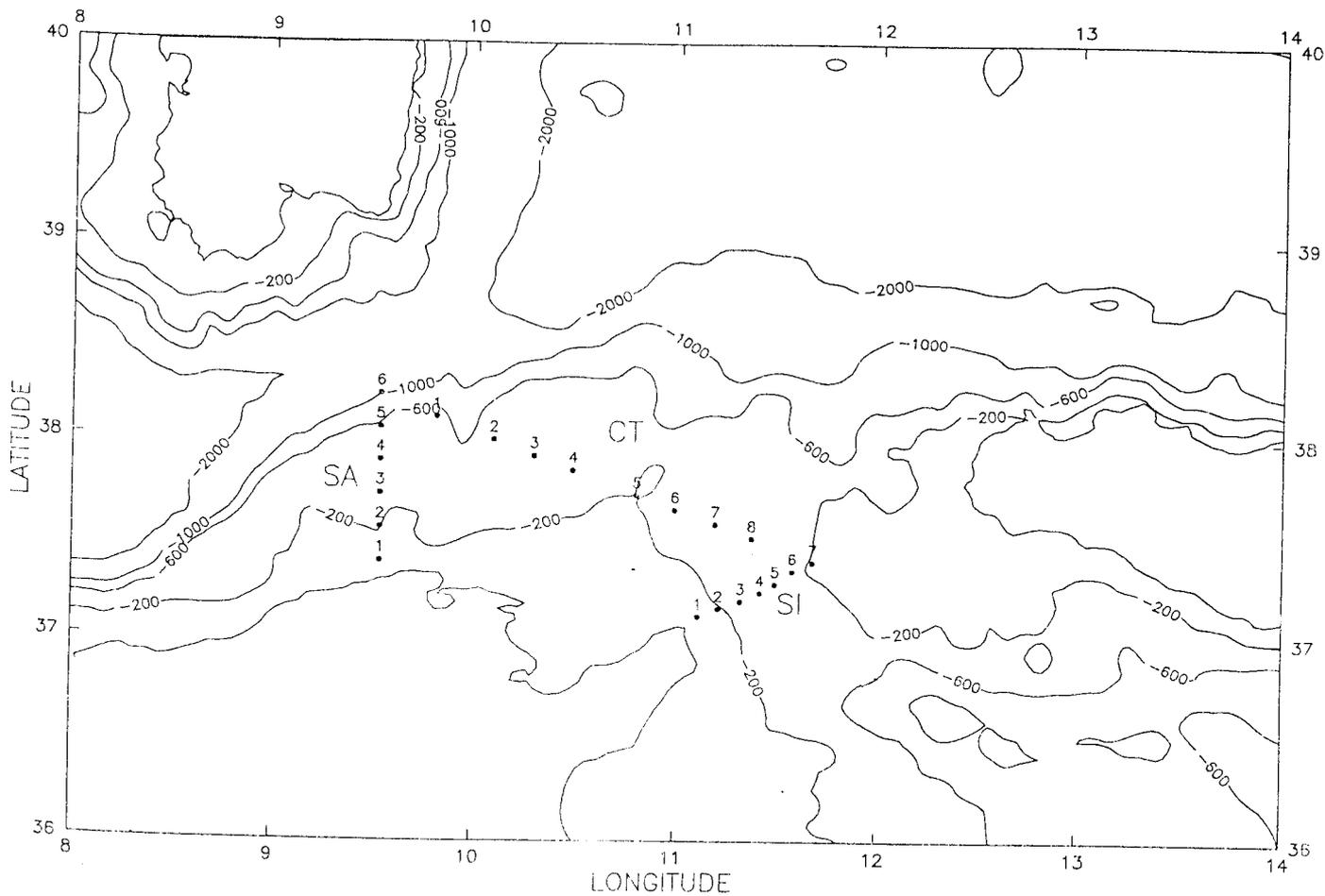


Figure 1

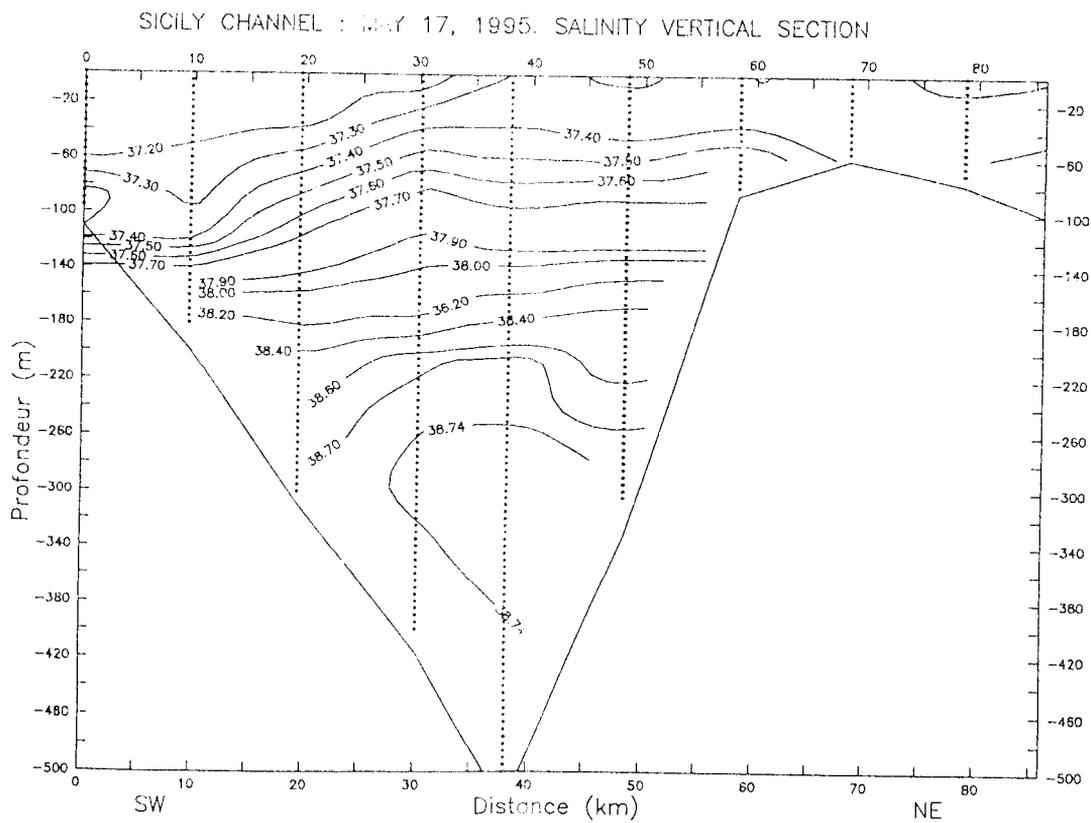


Figure 2a

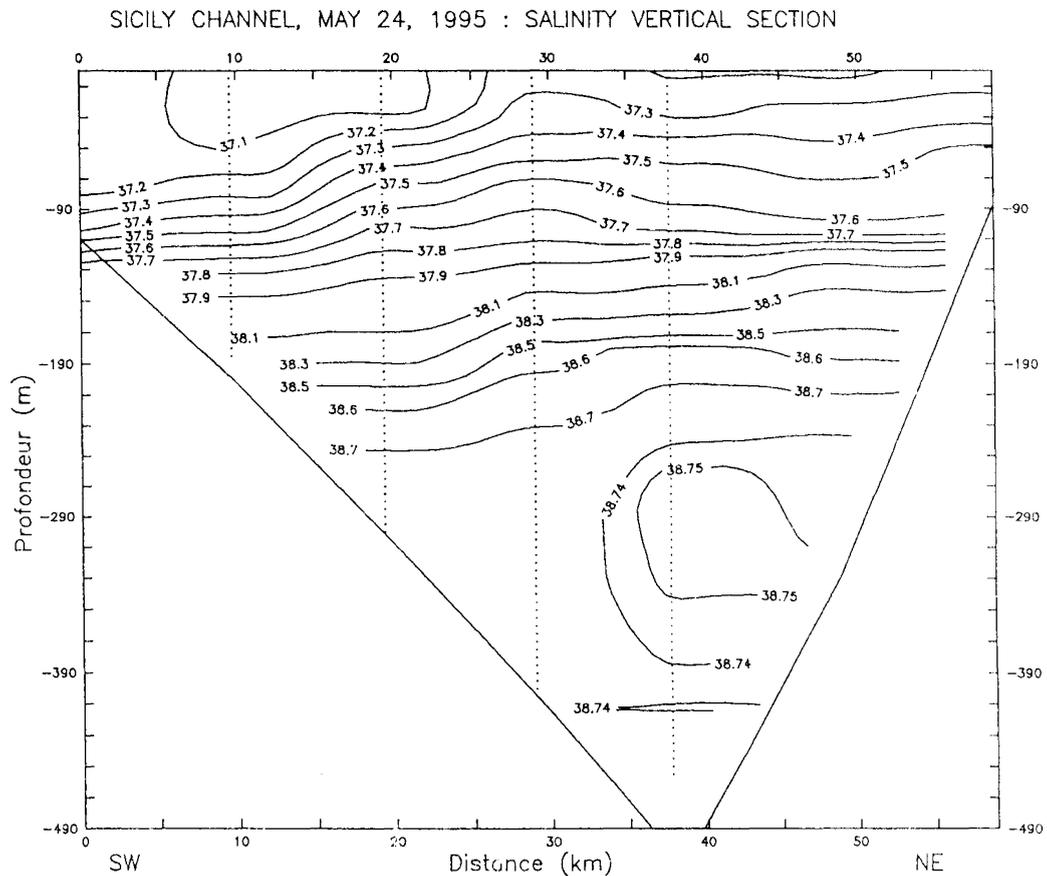


Figure 2b

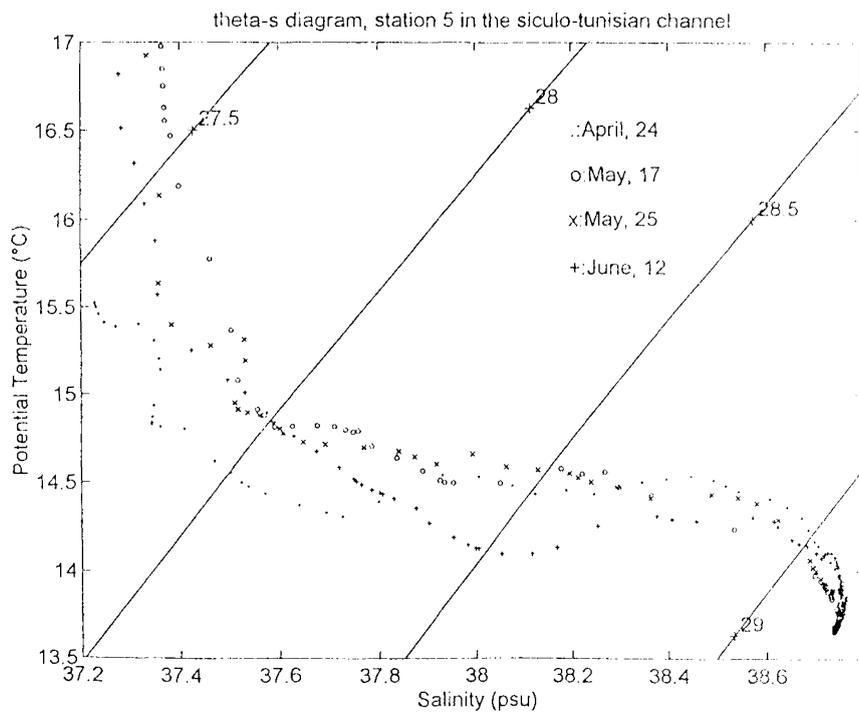


Figure 3

SICILY CHANNEL, MAY 24, 1995 : POTENTIAL TEMPERATURE VERTICAL SECTION

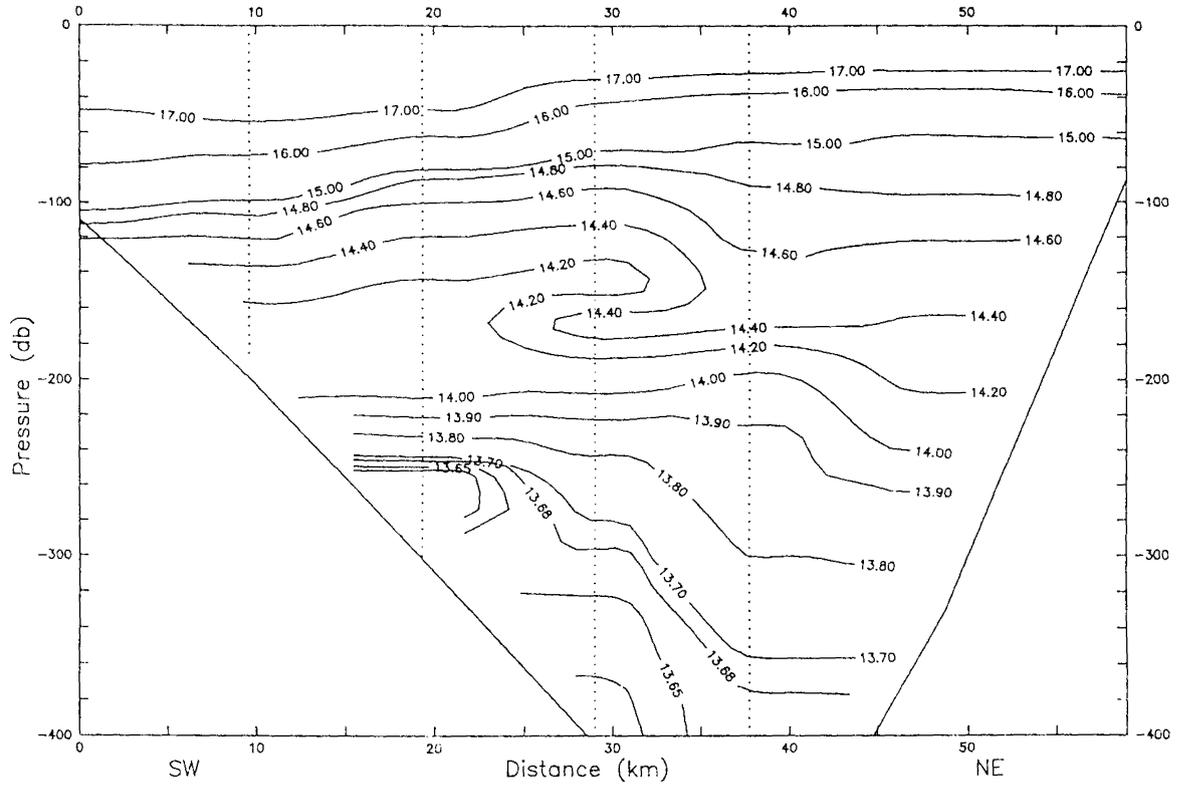


Figure 4a

SICILY CHANNEL: POTENTIAL TEMPERATURE VERTICAL SECTION. June 12, 1995

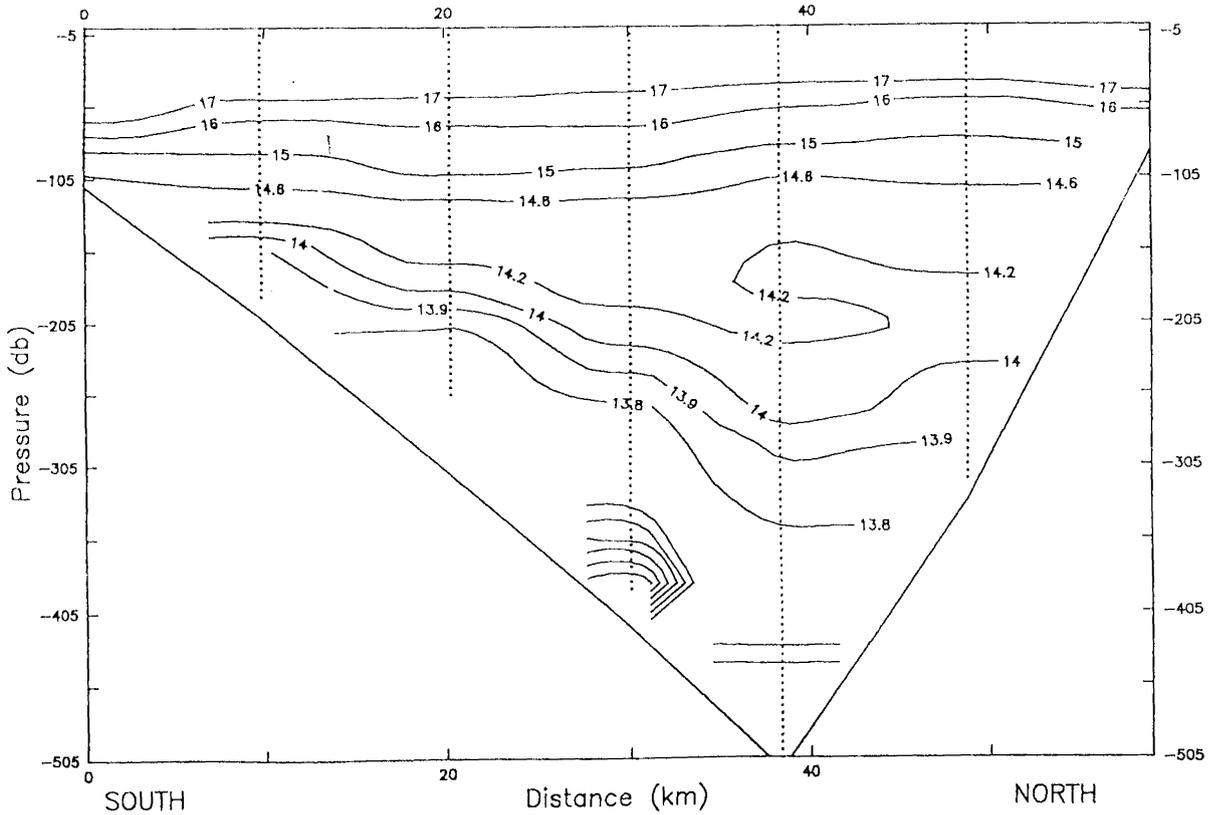


Figure 4b

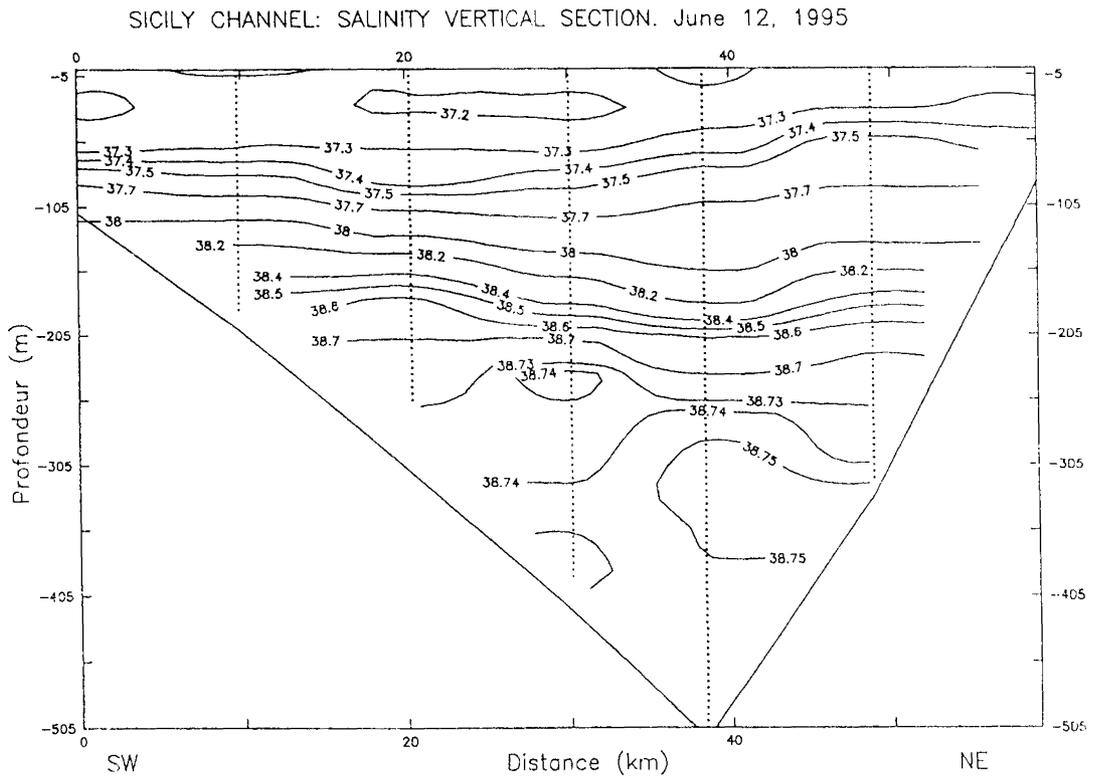


Figure 5a

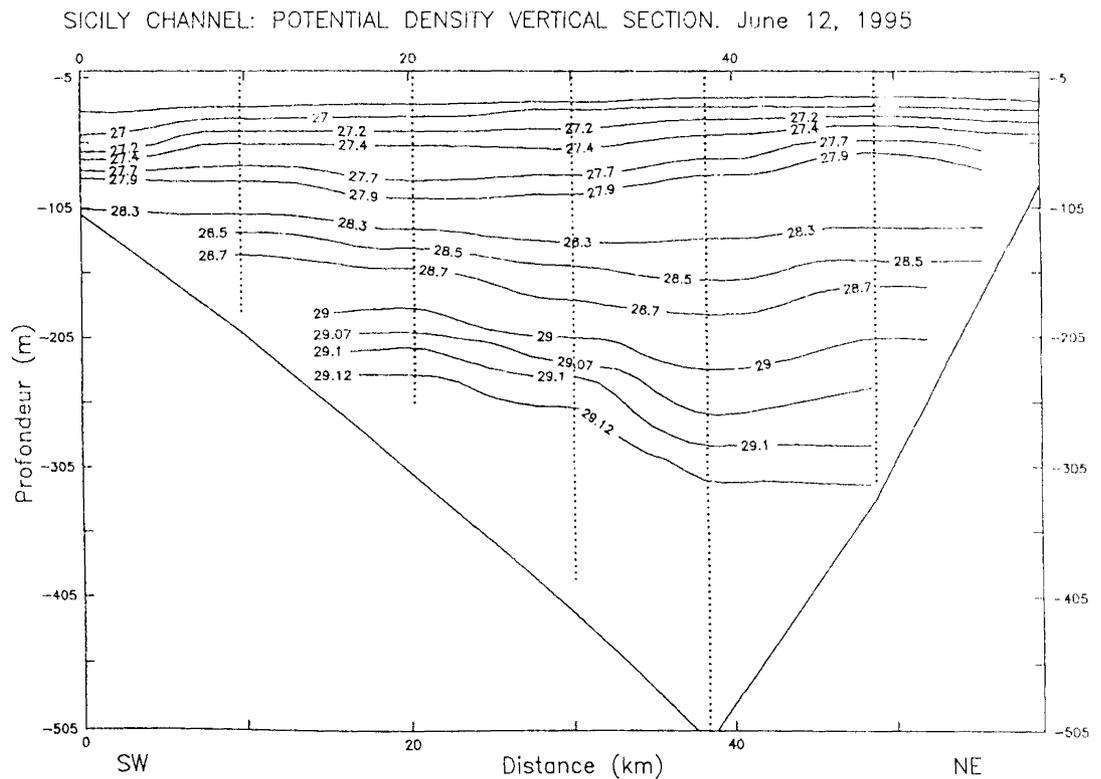


Figure 5b

SICILY CHANNEL, MAY 17, 1995 : GEOSTROPHIC VELOCITY VERTICAL SECTION

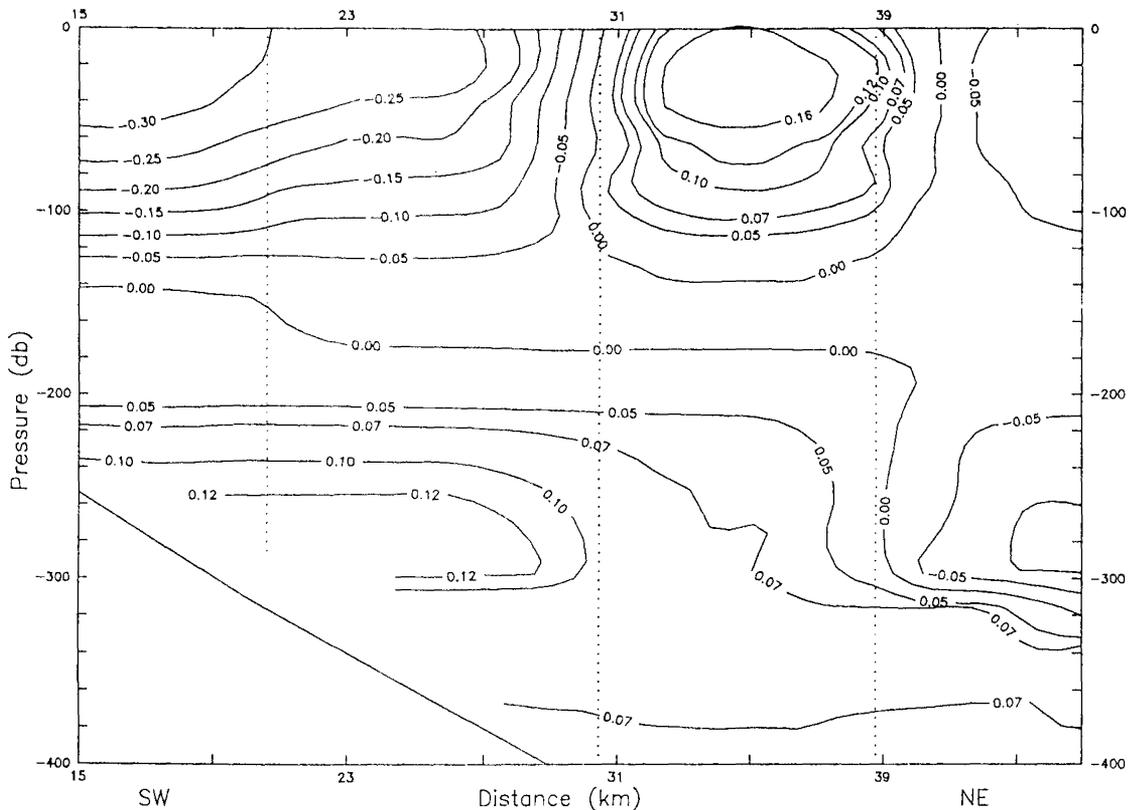


Figure 6a

SICILY CHANNEL, MAY 24, 1995 : GEOSTROPHIC VELOCITY VERTICAL SECTION

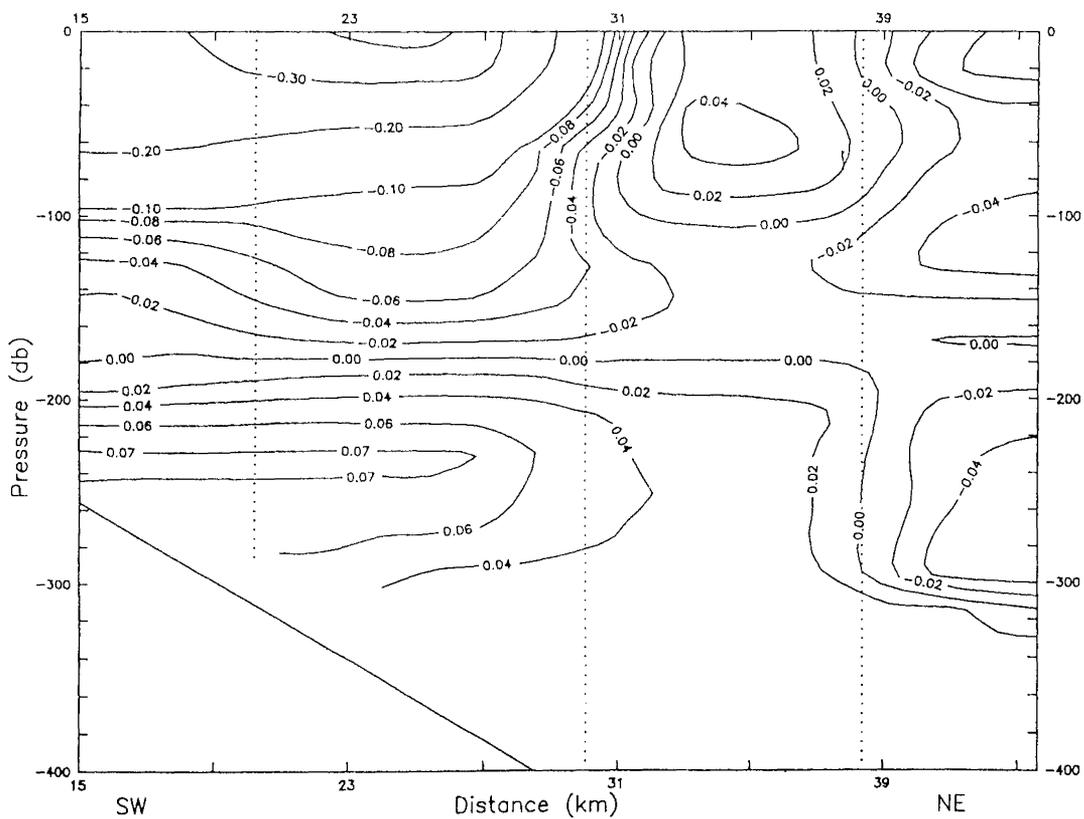


Figure 6b

SICILY CHANNEL, JUNE 12, 1995 : GEOSTROPHIC VELOCITY VERTICAL SECTION

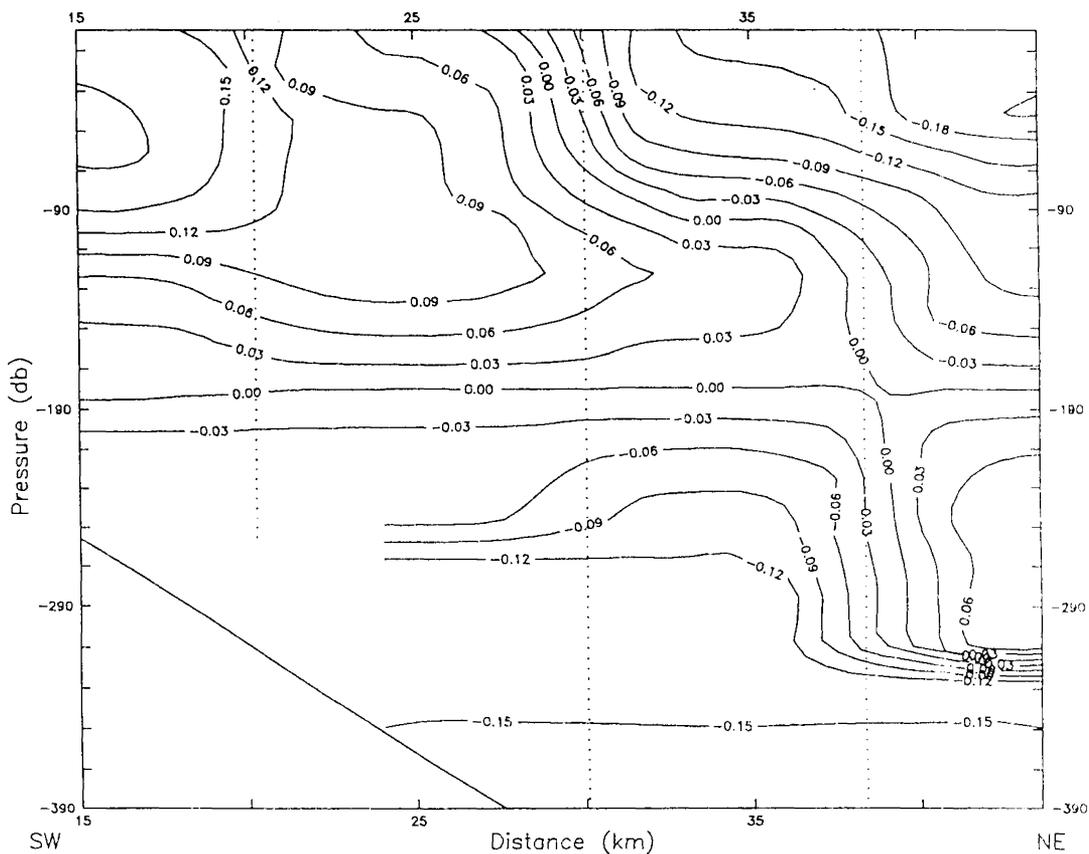
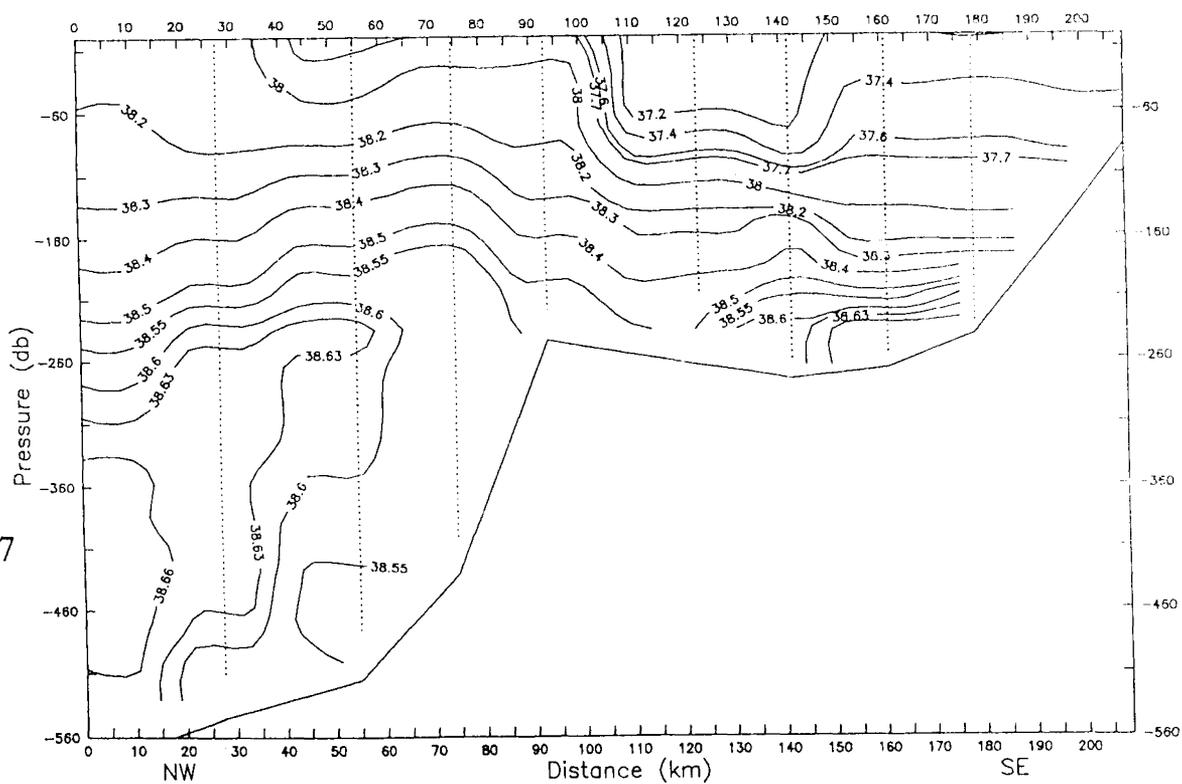


Figure 6c

CLOSING TRANSECT : JUNE 12, 1995. SALINITY VERTICAL SECTION



CLOSING TRANSECT, JUNE 12, 1995 : GEOSTROPHIC VELOCITY VERTICAL SECTION

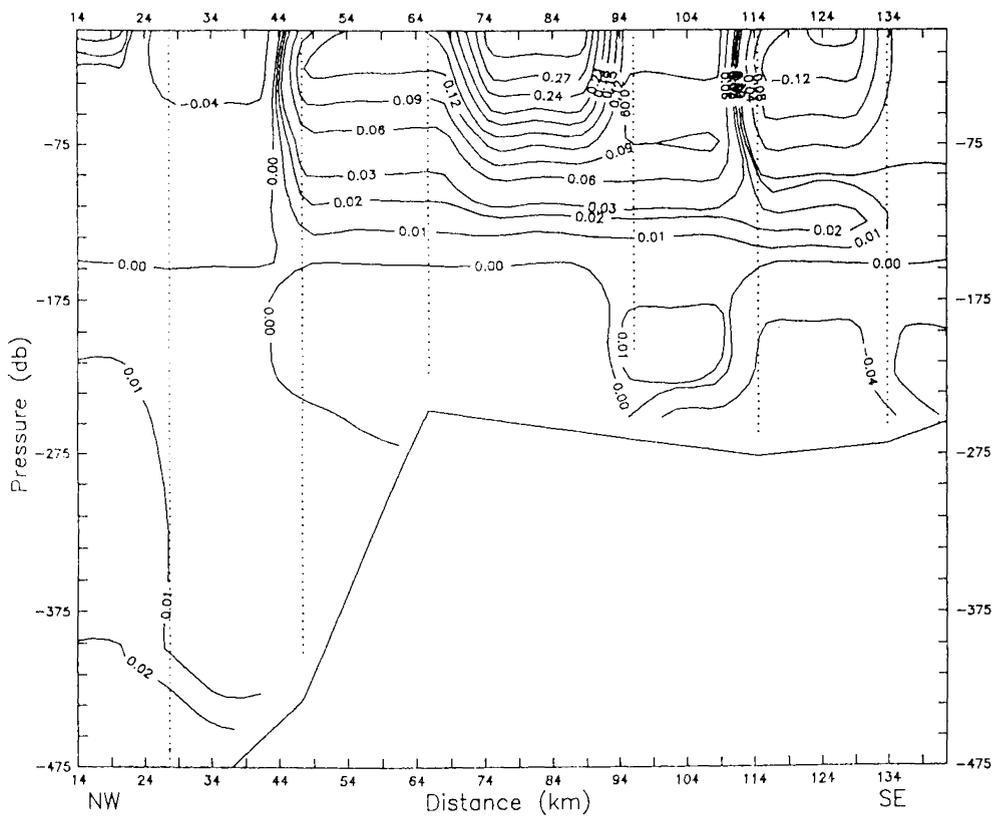


Figure 8

SARDINIA STRAIT: SALINITY VERTICAL SECTION. May 17, 1995

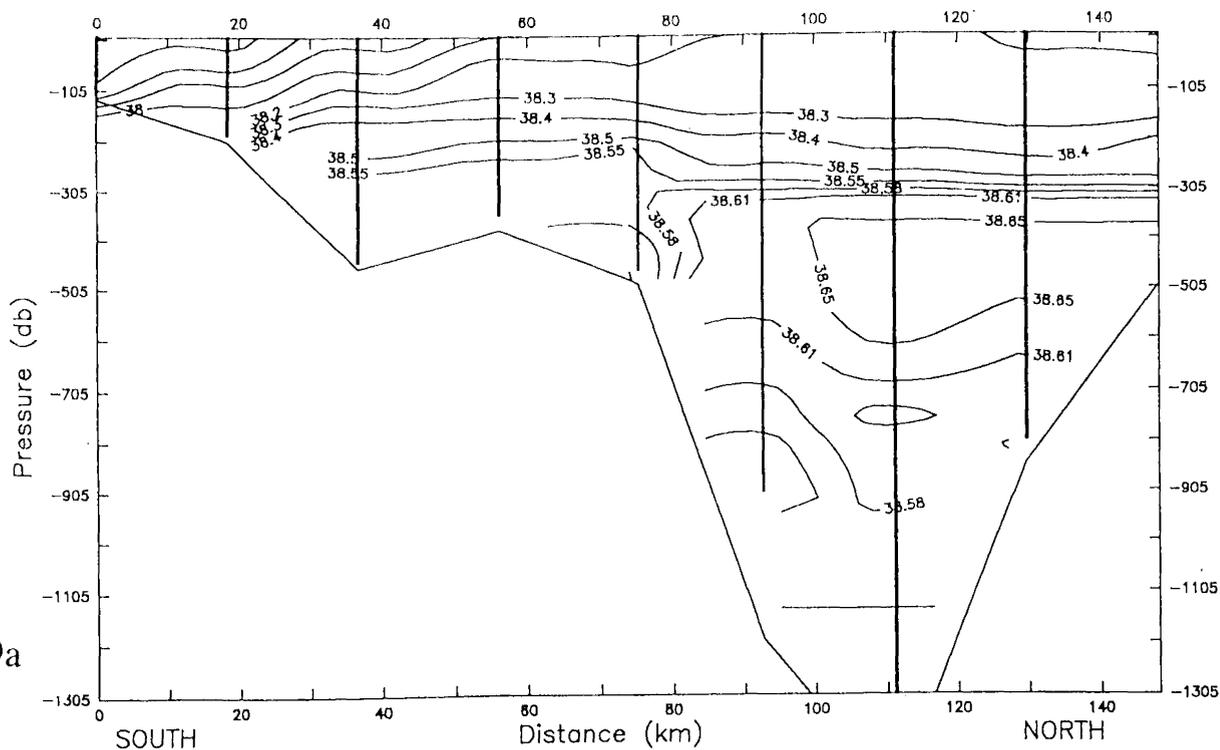


Figure 9a

SARDINIA STRAIT : JUNE 12, 1995. SALINITY VERTICAL SECTION

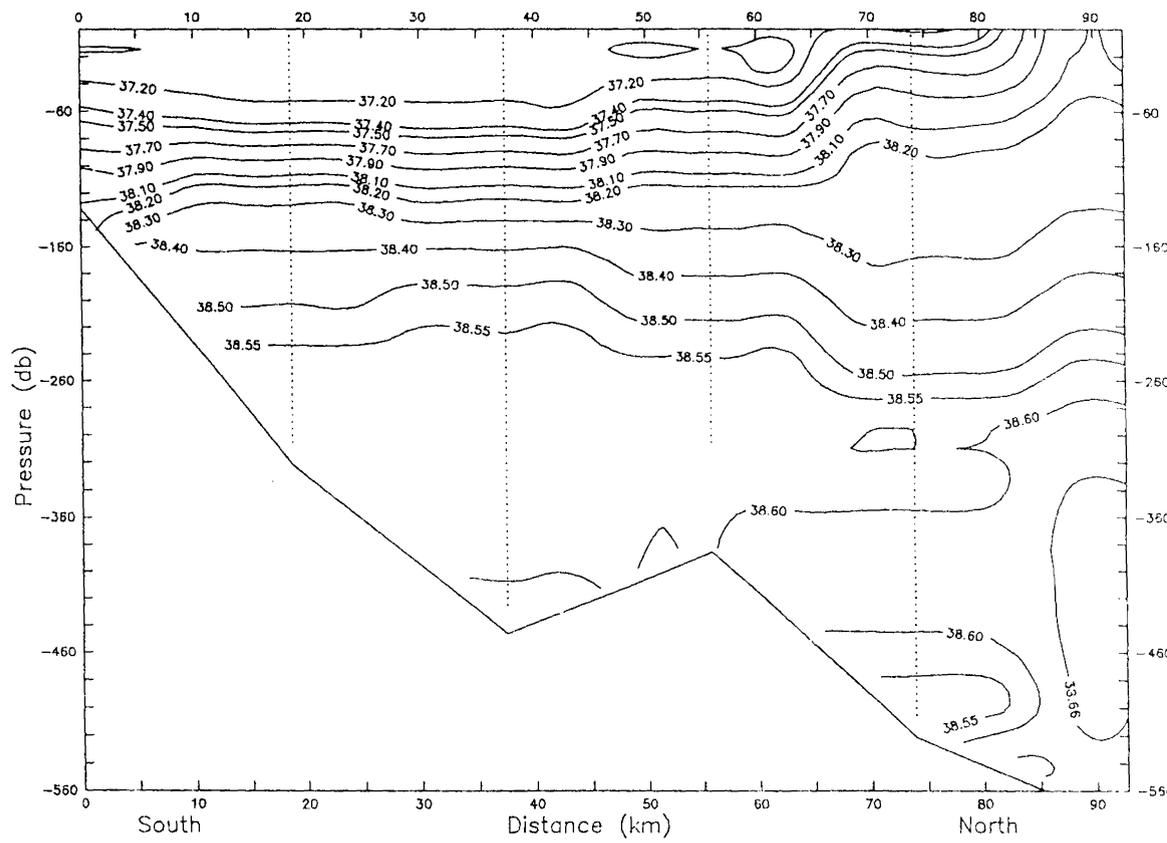


Figure 9b

SARDINIA STRAIT : JUNE 28, 1995. SALINITY VERTICAL SECTION

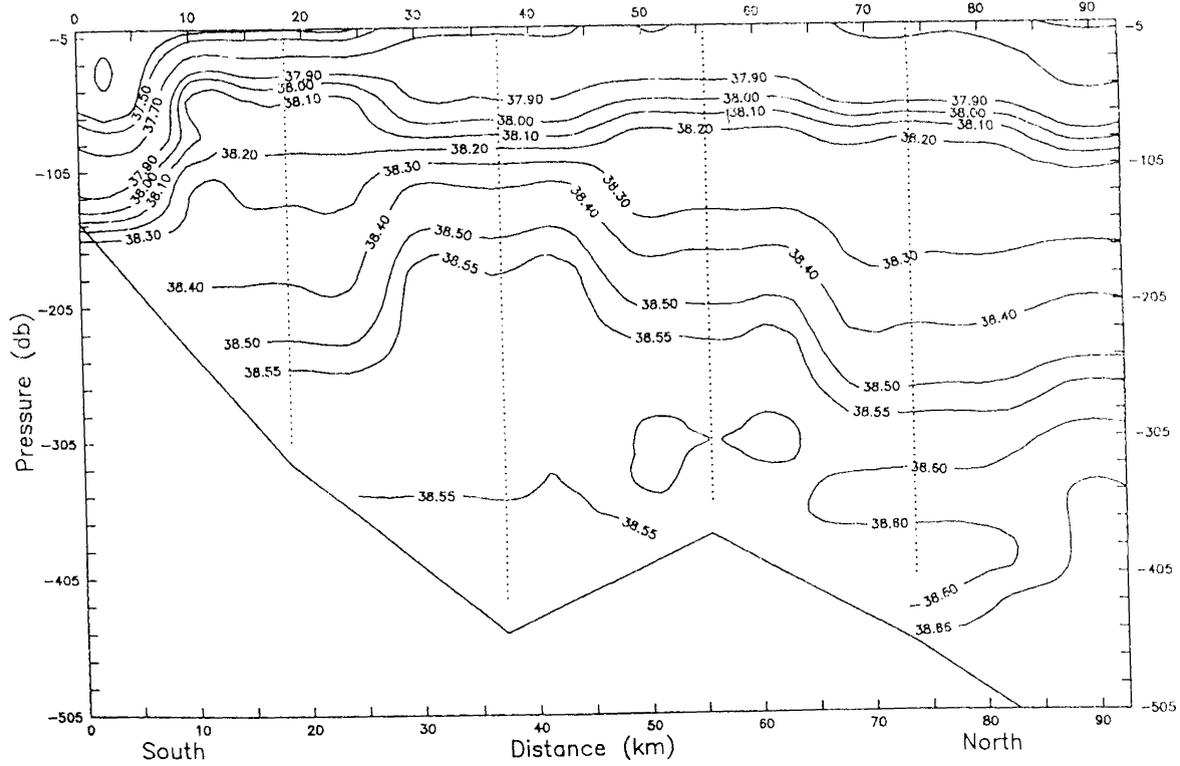


Figure 9c

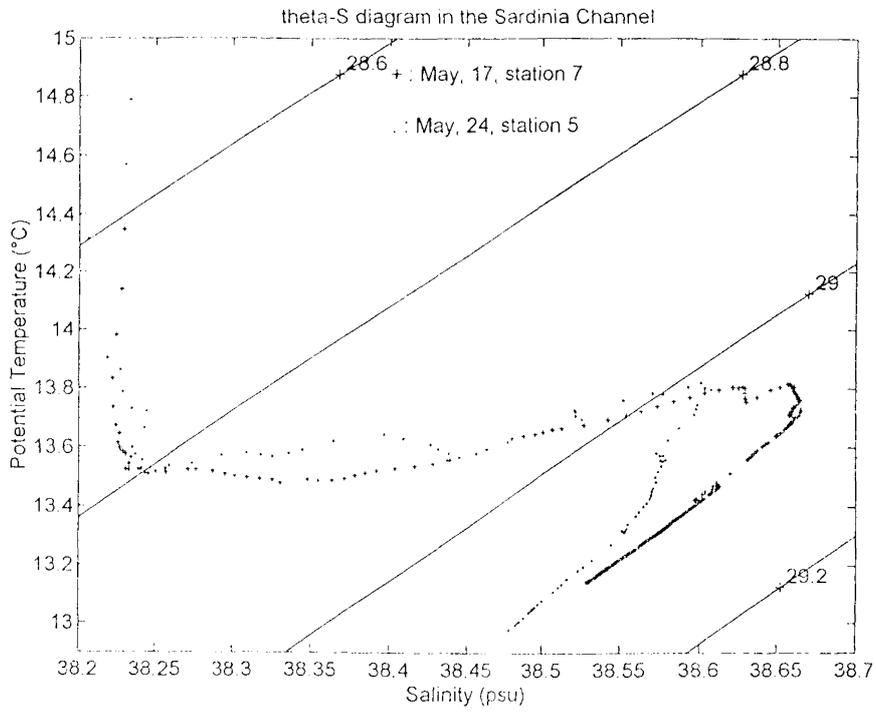


Figure 10

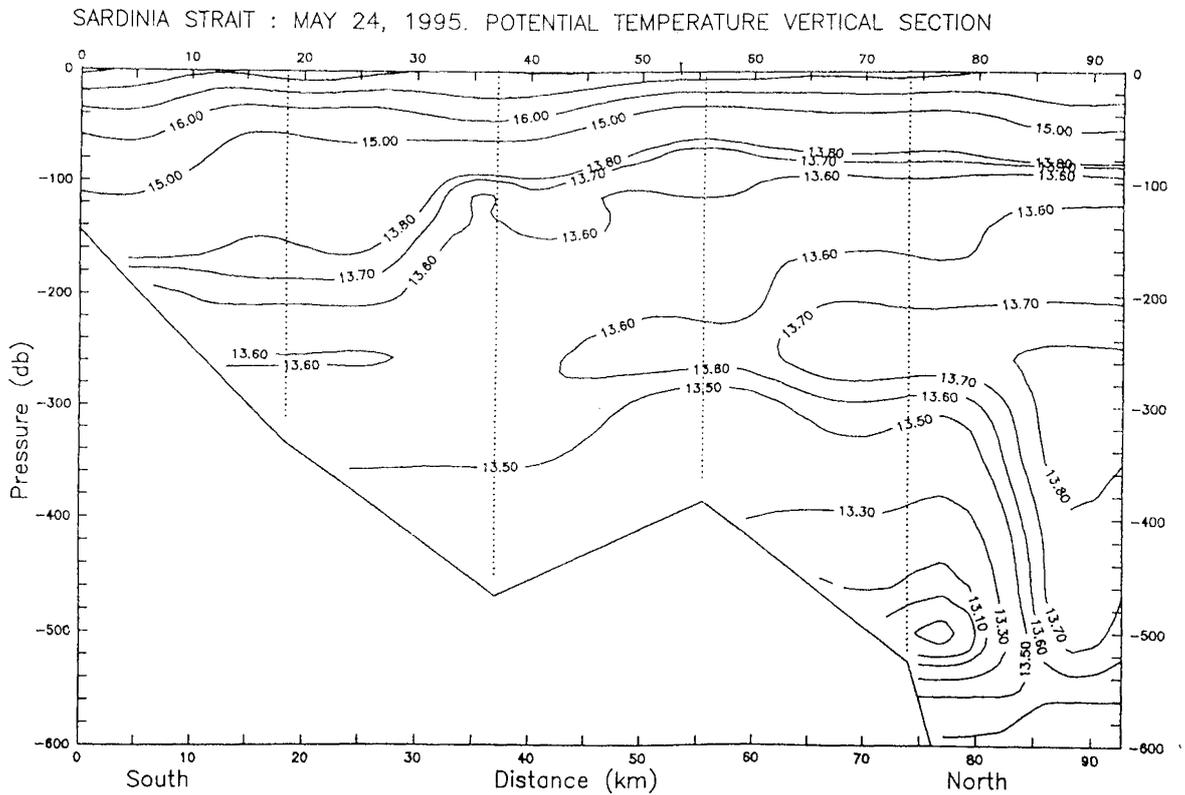


Figure 11a

SARDINIA STRAIT : JUNE 28, 1995. POTENTIAL TEMPERATURE VERTICAL SECTION

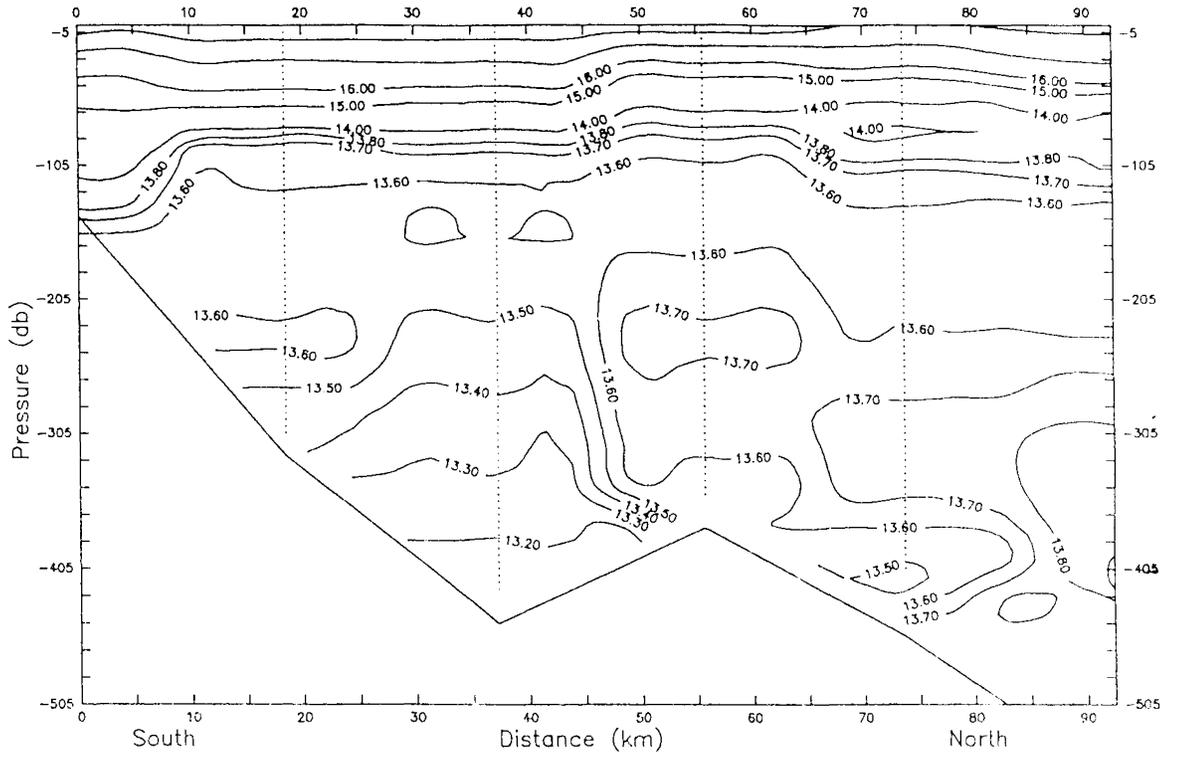


Figure 11b

SARDINIA STRAIT: POTENTIAL TEMPERATURE VERTICAL SECTION. May 17, 1995

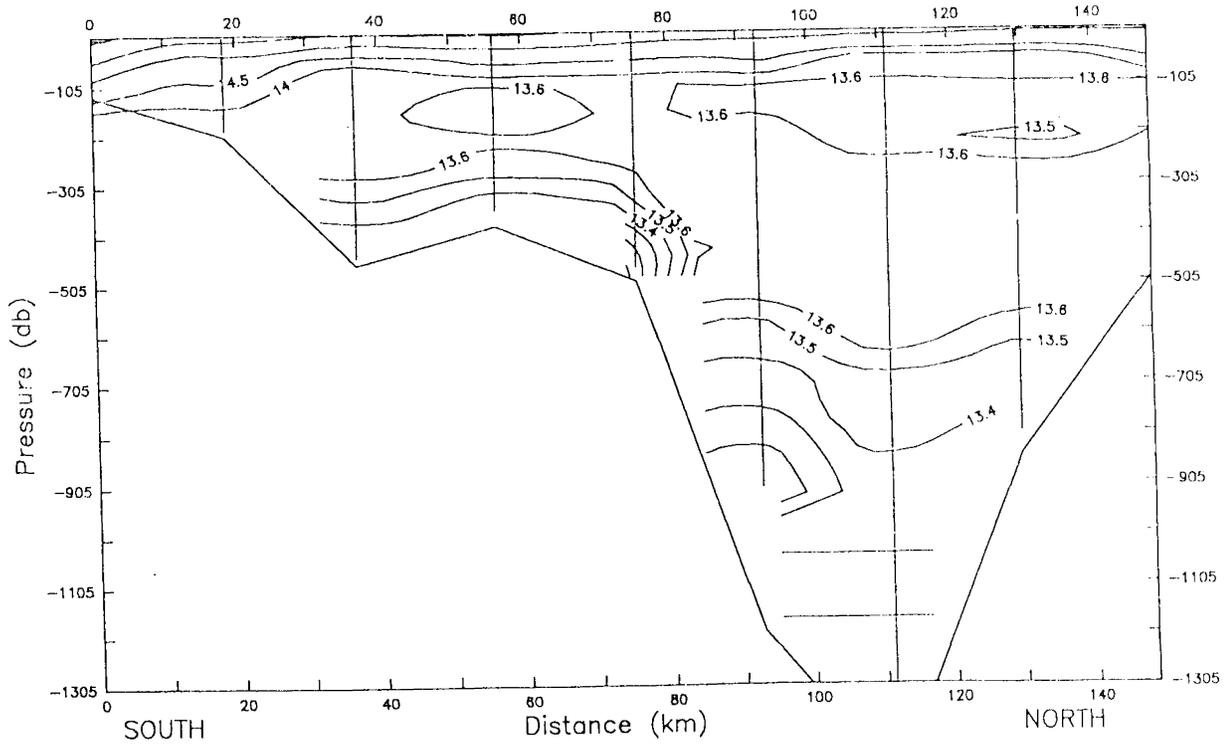


Figure 11c

SARDINIA STRAIT: OXYGEN VERTICAL SECTION. June 12, 1995

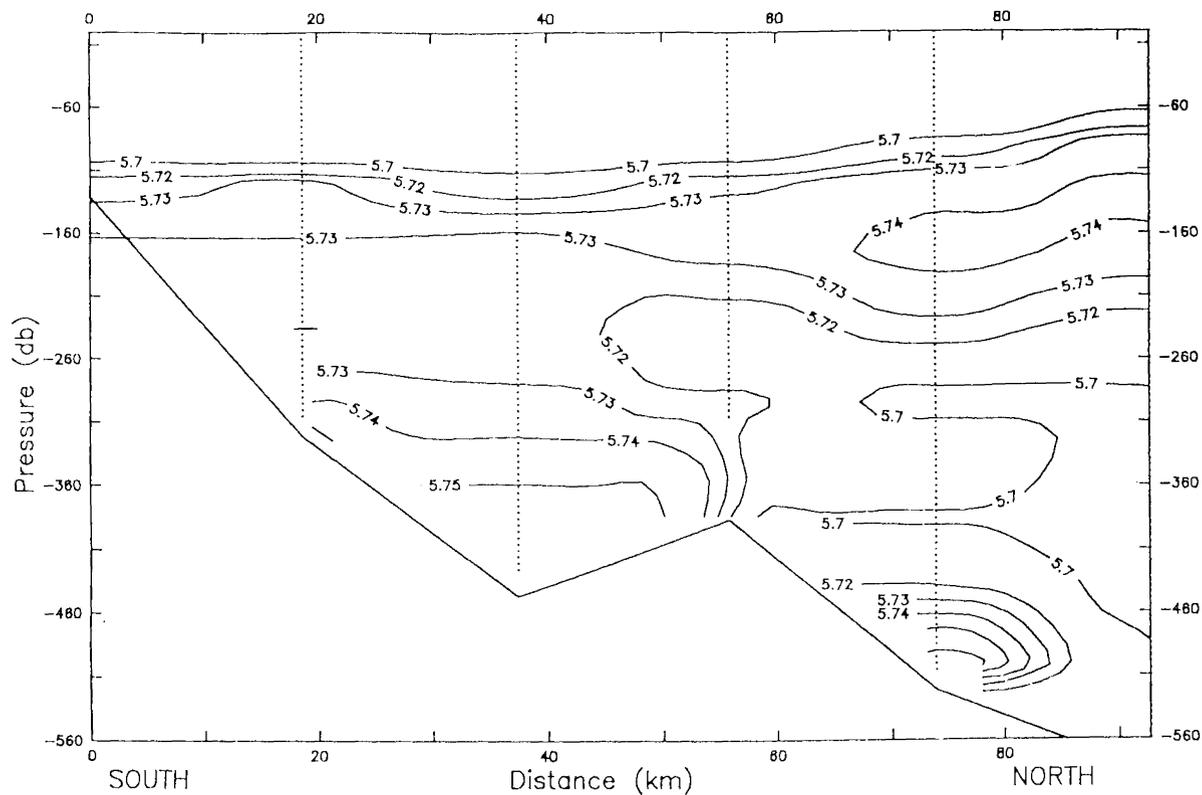


Figure 12

SARDINIA CHANNEL, MAY 17, 1995 : GEOSTROPHIC VELOCITY SECTION

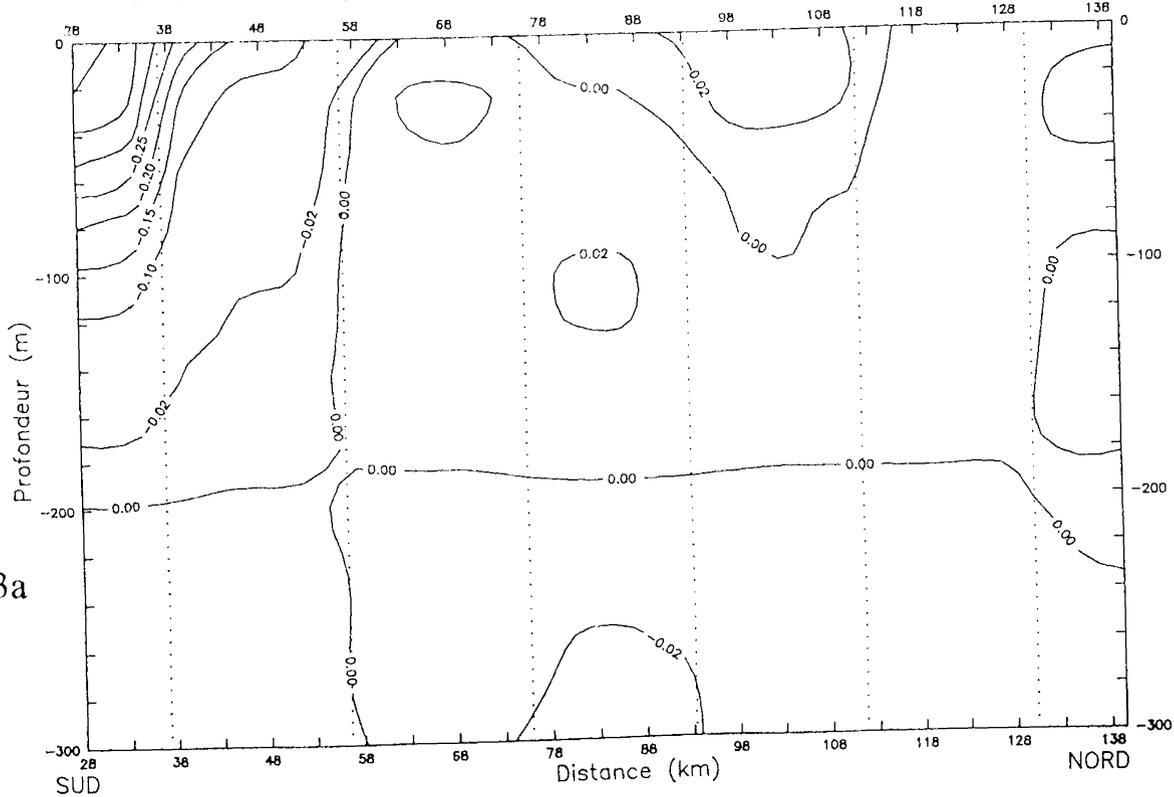


Figure 13a

SARDINIA CHANNEL, JUNE 12, 1995 : GEOSTROPHIC VELOCITY SECTION

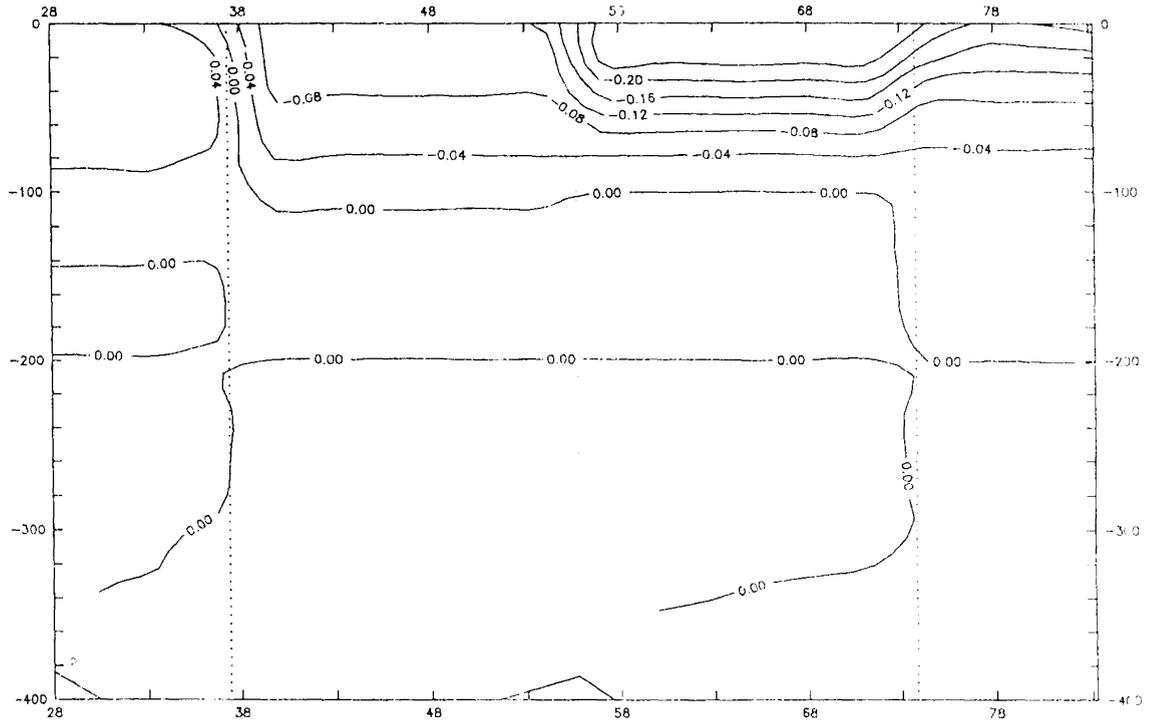


Figure 13b

SARDINIA STRAIT : GEOSTROPHIC VELOCITY VERTICAL SECTION. JUNE 23, 1995

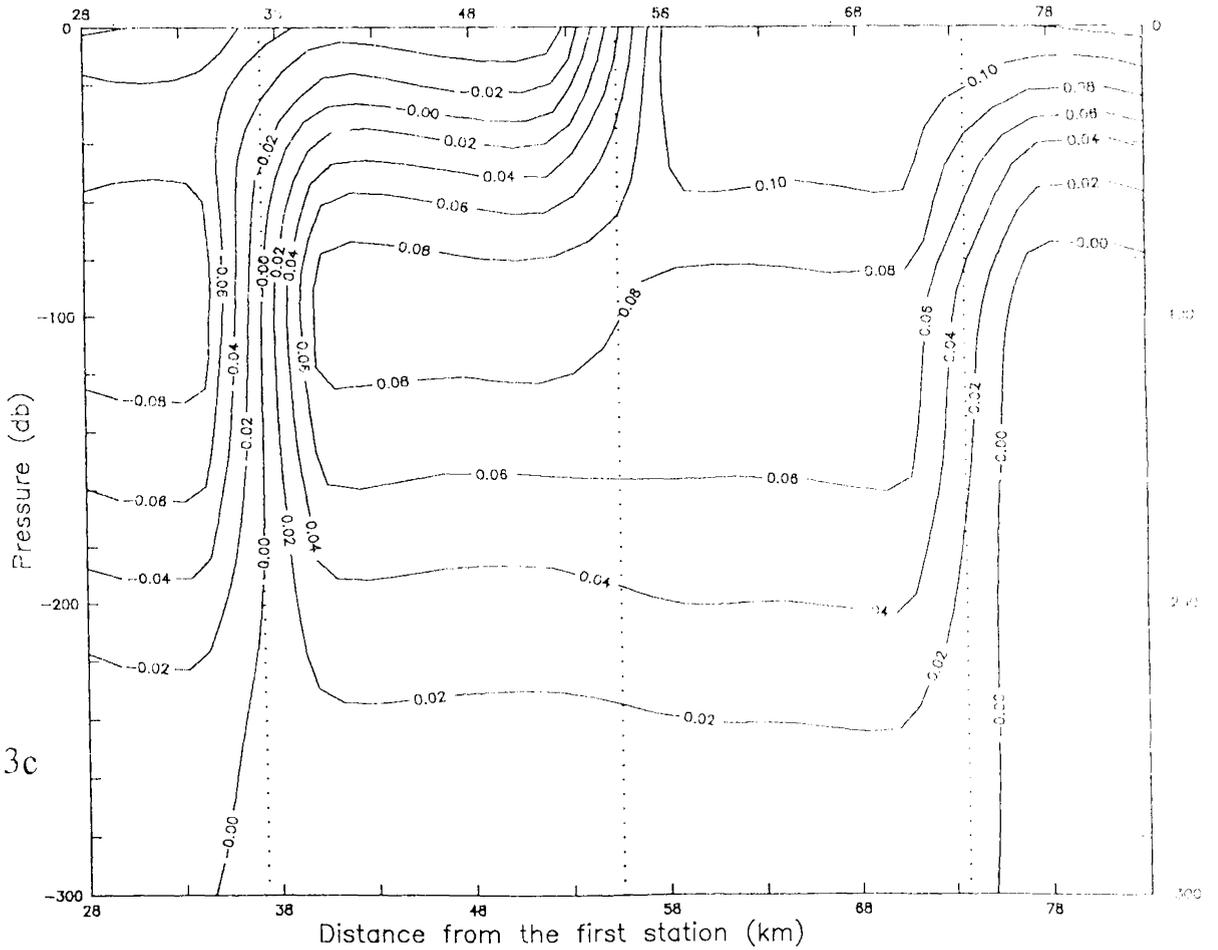


Figure 13c

BIBLIOGRAPHIE

- Astraldi M. and G. P. Gasparini (1994). The seasonal characteristics of the circulation in the Tyrrhenian Sea. in *Coastal and Estuarine Studies : Seasonal and Interannual Variability of the Western Mediterranean Sea*, vol. **46**, edited by Paul E. La Violette.
- Astraldi M., G. P. Gasparini, S. Sparnocchia, M. Moretti and E. Sansone (1996). The characteristics of the water masses and the water transport in the Sicily Strait at long time scales. *Bulletin de l'Institut Océanographique, Monaco, n° spécial 17, CIESM Science Series n°2*.
- Benzohra M. and C. Millot (1995). Characteristics and circulation of the surface and intermediate water masses off the Algerian coast. *Deep-Sea Research*, Vol. 42, No. 10, pp. 1803-1830.
- Béthoux J. P (1980). Mean water fluxes across sections in the the Mediterranean Sea, evaluated on the basis of water and salt budgets and of observed salinities. *Oceanologica Acta*, **3**, 1, 79-88.
- Béthoux J.P, B. Gentili, J. Raunet and D. Tailliez (1990). Warming trend in the western Mediterranean deep water. *Nature*, 347, 660-662.
- Budillon G., M. Moretti, E. Sansone and E. Zambianchi (1992). Seasonal Transports In The Strait Of Sicily : Updating Results. *Rapports et procès-verbaux, Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée*, **33**.
- Frassetto R. (1964). A study of the turbulent flow and character of the water masses over the Sicilian Ridge in both summer and winter. *Rapports et procès-verbaux, Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la Mer Méditerranée*, 18, pp. 812-815.
- Garzoli S. and C. Maillard (1979). Winter circulation in the Sicily and Sardinia straits region. *Deep-Sea Research*, vol. **26A**, pp. 933-954.
- Grancini G. and A. Michelato (1987). Current structure and variability in the strait of Sicily, in *Winds and currents of the Mediterranean Basin, Reports in Meteorology and Oceanography*, 40, vol.I, edited by Henry Charnock.
- Hopkins T. S. (1988). Recent Observations on the Intermediate and Deep Water Circulation in the Southern Tyrrhenian Sea. *Oceanologica Acta, special Issue n°9*, pp. 41-50.
- Lacombe H., J. C. Gascard, J. Gonella and J. P. Béthoux (1981). Response of the Mediterranean to the water and energy fluxes across its surface, on seasoning and interannual scales. *Oceanologica Acta*, **4**, 2, pp. 247-255.
- Lacombe H. and P. Tchernia (1972). Caractères hydrologiques et circulations des eaux en Méditerranée. Reprinted from *The Mediterranean Sea*, edited by Dowden, Hutchinson & Ross, Inc., Stroudsburg, Pa.
- Manzella G. M. R., G. P. Gasparini and M. Astraldi (1988). Water exchange between eastern and western Mediterranean through the Strait of Sicily. *Deep Sea Research*, Vol. **35**, pp. 1021-1035.

- Manzella G. M. R., T. S. Hopkins, P. J. Minnett and E. Nacini (1990). Atlantic water in the Strait of Sicily. *Journal of Geophysical Research*, vol. **95**, n° C2, pp. 1569-1575.
- Manzella G. M. R. (1994). The Seasonal variability of the water masses and transport through the Strait of Sicily, in *Coastal and Estuarine Studies : Seasonal and Interannual Variability of the Western Mediterranean Sea*, vol. **46**, edited by Paul E. La Violette.
- Millot C. (1987a). Circulation in the Western Mediterranean Sea, *Oceanologica Acta*, **10**, 2. pp. 143-149.
- Millot C. (1987b). The circulation of the Levantine Intermediate Water in the Algerian Basin. *J. Geophys. Res.*, Vol. **92**, pp. 8265-8276.
- Molcard R. (1972). Preliminary Results of current measurements in the Strait of Sicily in May 1970. *Proc. Saclant Conf.*, **7**, 82-95.
- Morel A. (1972). Caractères hydrologiques des eaux échangées entre le bassin oriental et le bassin occidental de la Méditerranée, *Cah. Oceanogr.*, **23**, pp. 329-342.
- Morelli C., C. Gantar and M. Pisani (1975). Bathymetry, gravity and magnetism in the strait of Sicily and in the Ionian Sea. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **XVII**, 39-58.
- Moretti M., E. Sansone, G. Spezie and A. De Maio (1993). Results of investigations in the Sicily Channel (1986-1990). *Deep-Sea Research II*, Vol. **40**, No 6, pp. 1181-1192.
- Ovchinnikov I. M. (1966). Circulation in the surface and intermediate layers of the Mediterranean. *Oceanology*, **6**, pp. 48-59.
- Roether W., B. Beniamino, B. Klein, D. Bragant, D. Georgopoulos, V. Beitzel, V. Kovacevic and A. Luchetta (1996). Recent changes in Eastern Mediterranean Deep Water. *Science*. Vol **271**.
- Rohling E.J. and H.L. Bryden (1992). Man-induced salinity and temperature increase in Western Mediterranean deep water. *J. Geophys. Res.*, Vol. **97**, No C7, pp. 11191-11198.
- Roussenov V., E. Stanev, V. Artale and N. Pinardi (1995). A seasonal model of the Mediterranean Sea general circulation. *J. Geop. Res.*, Vol. **100**, 13515-13538.
- Wüst G. (1961). On the vertical circulation of the Mediterranean Sea. *J. Geophys. Res.*, **66**, pp. 3261-3271.

الجمهورية التونسية

ر د م د - 0080 - 0330

نشرة المعهد الوطني لعلوم و تكنولوجيا البحار



I N S T M

عدد 23، II سنة 1996