

ACTA ADRIATICA

INSTITUT ZA OCEANOGRAFIJU I RIBARSTVO — SPLIT
SFR JUGOSLAVIJA

Vol. X. No. 12

LES SOURCES SOUS-MARINES DE LA BAIE DE KAŠTELA

MORPHOLOGIE, STRUCTURE HYDROLOGIQUE, CONDITIONS
HYDROGÉOLOGIQUES, RELATIONS GEOTECTONIQUES

VRULJE KAŠTELANSKOG ZALJEVA

MORFOLOGIJA, HIDROLOŠKA STRUKTURA, HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA,
GEOTEKTONSKI ODNOSI

SLOBODAN ALFIREVIĆ

SPLIT 1966.

LES SOURCES SOUS — MARINES DE LA BAIE DE KAŠTELA

— MORPHOLOGIE, STRUCTURE HYDROLOGIQUE, CONDITIONS
HYDROGÉOLOGIQUES, RELATIONS GEOTECTONIQUES —

VRULJE KAŠTELANSKOG ZALJEVA

— MORFOLOGIJA, HIDROLOŠKA STRUKTURA, HIDROGEOLOŠKA SVOJSTVA,
GEOTEKTONSKI ODNOSI —

par

Slobodan Alfirević

Institut d'océanographie et de pêche, Split

INTRODUCTION

Les sources sous-marines d'eau douce, dénommées »vrulje«, représentent un phénomène spécifique de l'hydrographie karstique. On les traite comme une partie de la problématique générale des eaux souterraines en terrain karstique, et ces derniers temps on accorde une attention spéciale à l'étude de leur morphogénèse de leur structure hydrologique et des possibilités d'exploitation en relation avec les problèmes de l'approvisionnement en eau.

La ceinture côtière et insulaire du bassin adriatique abonde en sources d'eau douce sous-marines. Leur apparition massive révèle une circulation intense des eaux souterraines dans la région du karst dinarique littoral, qui a pu développer au maximum les phénomènes spécifiques morphologiques et hydrogéologiques grâce à la structure géologique des côtes et des îles adriatiques.

La structure géologique de la ceinture adriatique est caractérisée par des strates mésozoïques et paléogènes. Les masses rocheuses de cette composition lithologique sont des calcaires et dolomites crétacés, du flysch éocène dont les caractéristiques hydrogéologiques et les relations tectoniques conditionnent la propagation des courants souterrains dans la région du karst littoral, qui se traduit par le jaillissement de sources d'eau douce — »vrulje« — en Adriatique.

Les sources sous-marines de l'Adriatique ont été, jusqu'à présent, peu explorées et nous n'avons même pas un inventaire complet de leurs localités. Les recherches effectuées par divers auteurs se sont principalement orientées vers l'observation des qualités hydrographiques de chacune des sources, l'examen des possibilités d'exploitation par captage ou se sont bornées à les enregistrer comme un phénomène de résurgence des eaux souterraines en Adriatique.

Exposant les problèmes hydrologiques du karst littoral Kuščer (1950) présente un aperçu de l'hydrographie du Velebit nord en insistant surtout sur les sources qui, de Jurjevo à Žrnovnica, apparaissent dans le canal du Velebit. Petrik (1961) qui a étudié les sources le long des côtes d'Istrie, du Littoral croate et de la Dalmatie moyenne, publie des données relatives à la position, la température et la salinité des objectifs examinés qu'il classe en simples, ou multiples, s'ils se présentent comme un grand complexe de sources.

Des séries de mesures ont été effectuées sur la côte est du golfe de Trieste (Perin-Luca, 1960) dont le but était, en se basant sur les isothermes profondes et superficielles et les isobathes, d'essayer d'établir l'existence éventuelle de sources dans la région plus profonde et située plus au large du golfe de Trieste.

Les relations entre les sources terrestres et sous-marines ont été étudiées par Gjurašin (1942, 1943) par interprétation du mécanisme hydraulique, tandis que Šegvić (1955) au moyen d'un appareil approprié a essayé d'effectuer la déminéralisation naturelle de la source sous-marine de Postire dans l'île de Brač. Les travaux d'auteurs, tels que Lorenz (1859), Keller (1963), présentent certaines sources sous-marines comme un phénomène de résurgence des eaux souterraines.

Dans le cadre des recherches sur les propriétés hydrographiques de l'Adriatique on a enregistré des données hydrographiques (février 1950) pour les sources de la baie de Kaštela, et d'avril à juillet 1948 pour la région avoisinant les sources situées près de Makarska (Buljan et Marinković, 1956.).

Les sources sous-marines en Méditerranée ont été étudiées dans le golfe du Lion, près de Marseille (Corroy, 1958.), le long des côtes libano-syriennes (Gravel, 1930) et, dans le golfe de Taranto, en particulier, où des recherches sur les propriétés hydrologiques de ces sources se sont poursuivies dans le but précis d'en examiner les possibilités d'exploitation Cerruti, 1938, 1943, Parenzan, 1960.).

Si l'on s'en rapporte aux travaux, effectués à ce jour, relatifs aux sources sous-marines de l'Adriatique étudiées sous divers aspects, il n'a pas été possible d'établir qu'il s'agissait de données morphométriques précises permettant de définir la morphologie des sources sous-marines. L'interprétation géologique de leur apparition de leur modelage et de leur fonction n'a pas été non plus envisagée en relation avec les caractéristiques hydrogéologiques et les rapports tectoniques des régions d'où elles sortent. Il en est de même pour leur structure hydrologique qui n'a pas été établie au cours d'une année hydrologique en suivant de façon continue les chagements saisonniers qui confèrent à cette structure des aspects divers.

C'est pourquoi les investigations relatives aux sources sous-marines de la baie de Kaštela ont été orientées aussi dans ce sens. Des examens préliminaires de la morphogenèse de ces sources (Alfirević, 1960, 1961, 1963.) ont servi de base aux recherches complexes sur leur morphologie, hydrologie, hydrogéologie et géotectonique qui, entre 1957 et 1964, ont été effectuées à plusieurs reprises sur ces objectifs.

C'est ainsi que, pour la première fois en Adriatique, on a suivi les fluctuations annuelles des propriétés hydrographiques des sources sous-marines qui ont été soumises à une étude parallèle de leurs caractéristiques morphologiques et hydrogéologiques. Ce travail traite des résultats de ces recherches effectuées sur les sources de la baie de Kaštela qui, par leur volume et leur éloignement de la côte, comptent parmi les plus importantes sources sous-marines d'eau douce en Adriatique.

Je me dois d'exprimer ici ma gratitude envers le prof. dr. V. Kochansky-Devidé de l'Institut de Géologie et Paléontologie de la Faculté des Sciences Naturelles-Mathématiques de Zagreb pour l'identification de la microfaune des foraminifères fossiles, envers le dr. M. Herak, professeur de géologie à la même faculté pour l'intérêt témoigné à mes travaux et pour ses conseils éclairés, ainsi qu'envers mon collègue D. Šikić, géologue de l'Institut de Géologie et Paléontologie de la Faculté de Technologie de Zagreb pour les données sur ses recherches géologiques dans le massif du Kozjak qu'il a eu l'obligeance de mettre à ma disposition. Je remercie aussi le dr. M. Buljan, chef du laboratoire d'hydrochimie ainsi que le dr. M. Zore-Armanda, chef du laboratoire d'hydrophysique de l'Institut d'océanographie et de pêche de Split pour les analyses des données hydrographiques recueillies au cours de nos explorations, et pour ses conseils utiles. Merci également au commandant A. Jončić et à l'équipage du bateau explorateur de l'Institut de Split, le »Predvodnik«, ainsi qu'à l'équipe des plongeurs autonomes du P. I. K. »Mornar« de Split pour leur dévouement exemplaire et leurs efforts au cours des travaux sur le terrain.

Je suis aussi très reconnaissant à L. Meter, enseignant de biologie, assistant technique à l'Institut qui, au cours des recherches a participé consciencieusement et avec persévérance à toutes nos sorties périodiques en dépit de très mauvaises conditions de travail sur les lieux.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les recherches sur les sources sous-marines de la baie de Kaštela ont été effectuées à bord du bateau-moteur d'exploration scientifique »Predvodnik« et à l'aide du canot auxiliaire à moteur »Gira« de l'Institut d'océanographie et de pêche de Split.

Les caractéristiques morphologiques du relief sous-marin dans la région des sources ont été étudiées au moyen des détecteurs ultra-soniques »ELAC-ECHOGRAPH«, de fabrication allemande — fréquence 45 kilocycles — et »SIMRAD«, de fabrication norvégienne — fréquence 38,5 kilocycles. Les enregistrements échographiques ont été effectués sur huit profils, en deux séries de quatre profils sur chaque source sous-marine. Avant l'enregistrement, on posait sur chaque source sous-marine, pour en indiquer le tracé, neuf flotteurs destinés à marquer les points extrêmes de chaque profil. Le flotteur central était placé sur le point même d'émergence de la source, les autres représentant les points extrêmes des profils, transversaux, longitudinaux et diagonaux sur les sources I et II (stations No 2 et No 3).

Les mesures bathymétriques et morphométriques des sources ont été prises par les plongeurs en exploration sub-aquatique directe au moyen de leurs profondimètres. Ces mesures ont été combinées avec des enregistrements ultra-soniques, ce qui a permis de reconnaître très exactement l'orifice au fond de la

source et de contrôler les données bathymétriques concernant le fond sous-marin, étant donnée qu'il s'agissait d'objectifs spécifiques.

L'étude de la structure hydrologique des sources sous-marines de la baie de Kaštela a consisté à prélever des échantillons d'eau de mer en vue de la détermination de la salinité et de la chlorinité et à faire des relevés directs de la température aux niveaux: 0, 5, 10, 20 et 30 mètres. Les échantillons d'eau de mer ont été prélevés à l'aide de la bouteille à renversement. Les températures ont été, en général, prises au moyen de thermomètres à renversement, protégés, de marque Richter-Wiese, Berlin; la salinité et la chlorinité ont été déterminées par la méthode Mohr de titrage des échantillons au nitrate d'argent.

Les sédiments marins superficiels, dans la région des sources ont été prélevés au ramasseur Petersen. La composition mécanique des sédiments a été étudiée en laboratoire par la méthode de sédimentation dans le cylindre de Novak. Les types de sédiments ont été déterminés d'après la classification physique des particules et divisés (Gračanin, 1947.) en cinq fractions: I = < 0,01; II = 0,01–0,05; III = 0,05–0,1; IV = 0,1–2,00; V = > 2,00 mm.

Lors de l'étude de la composition géologique du fond sous-marin dans la région de sortie des sources on s'est servi — pour la première fois dans les recherches de géologie sous-marine en Adriatique — de la méthode des explosions sous-marines. Afin de se procurer des échantillons géologiques de la roche à l'ouverture même des sources, nous avons employé l'explosif »Vitezit 100«. L'équipe des plongeurs au cours d'explorations préalables déposait directement la charge près de l'ouverture rocheuse de la source, puis ramassait ensuite les fragments de roches arrachés par l'explosion.

Pour la détermination de la composition lithologique et micropaléontologique des roches des sources sous-marines on s'est servi des morceaux détachés par l'explosion. La teneur en CaCO_3 a été déterminée volumétriquement. La microfaune des foraminifères a été identifiée dans les poussières de roche au moyen du baume canadien.

L'équipe des plongeurs, sur l'emplacement même des sources, a photographié le fond sous-marin à la sortie de la source et a pu ainsi recueillir une documentation sub-aquatique précise.

Afin de prouver les communications souterraines des sources sous-marines avec la source de terre ferme de Pantan, près de Divulje, nous sommes servis de fluorescéine que l'équipe des plongeurs a versée dans l'ouverture de sortie de la source sous-marine.

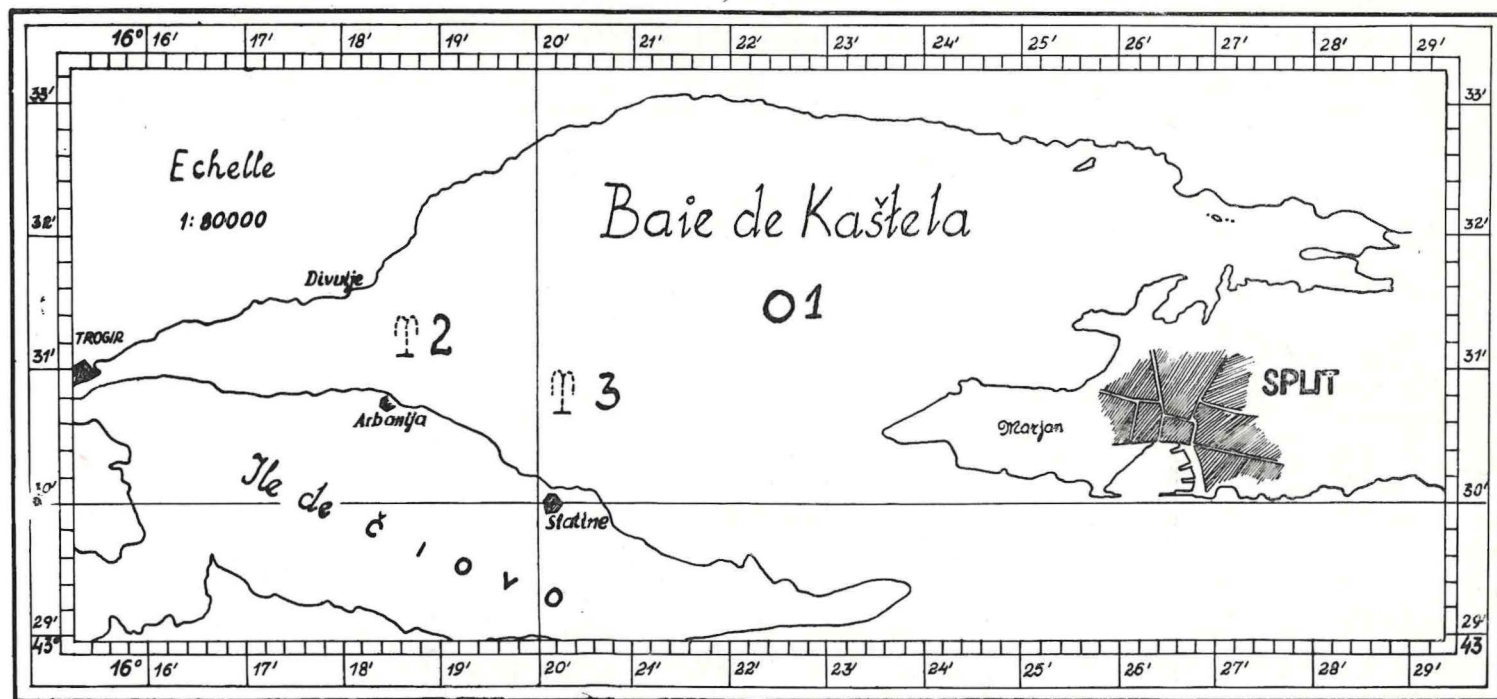


Fig. 1. Région sur laquelle ont porté les recherches hydrogéologiques dans la baie de Kaštela

Légendes: Station No. 1 — eau de mer typique

Station No. 2 — source sous-marine d'eau douce (I »Vrulja«) près de Divulje

Station No. 3 — source sous-marine d'eau douce (II »Vrulja«) près de Slatine

RÉSULTATS OBTENUS

Nous avons choisi, comme objet de nos recherches, les deux sources sous-marines centrales de la baie de Kaštela, remarquables par leur abondance, leur étendue et leur éloignement de la côte. Dans la partie occidentale de la baie de Kaštela se trouvent deux sources sous-marines d'eau douce à fort débit: la première sur la ligne Arbanija (île de Čiovo) — Divulje, la seconde sur la ligne Slatine (île de Čiovo) — Kaštel Stari.

Ces sources sont situées assez loin de la côte surtout la seconde qui se trouve à plus de 1000 mètres du rivage de l'île de Čiovo. En automne, en hiver et au printemps, elles sont bien visibles, donc pendant les saisons riches en précipitations, alors qu'en été on ne les remarque pas. En période d'activité de ces sources, surtout par mer calme, on voit à ces endroits-là un bouillonnement onduleux de l'eau en cercles concentriques qui est un obstacle au passage des bateaux de faible tonnage et s'accompagne d'une certaine turbidité

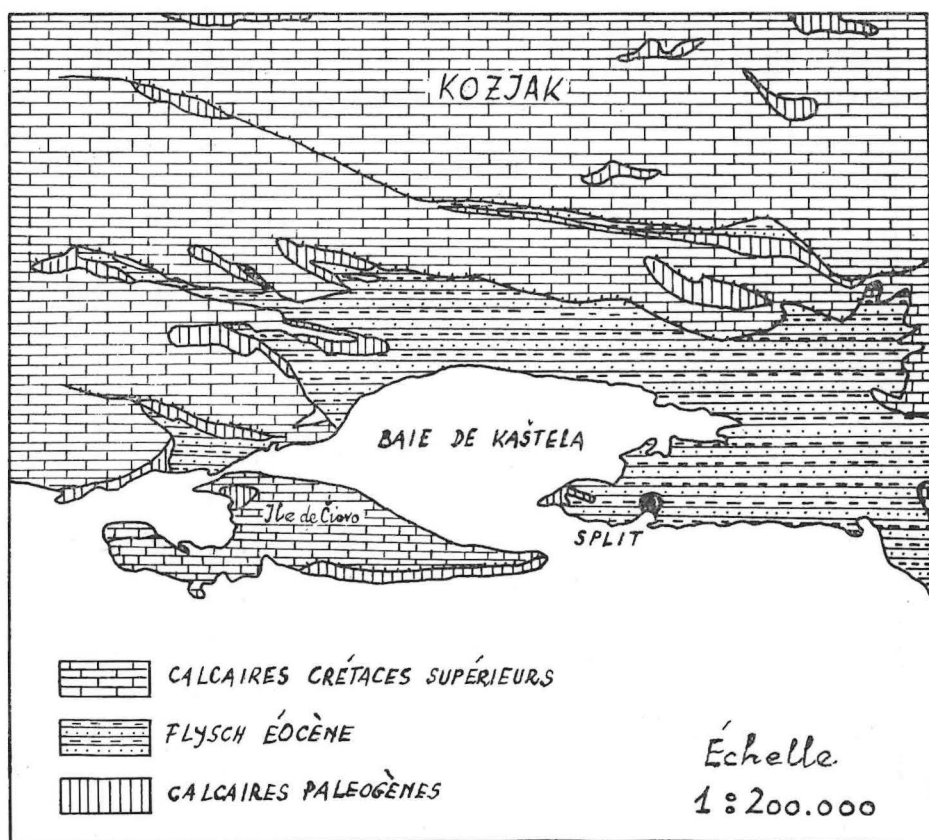


Fig. 2. Structure géologique du Massif du Kozjak, de la presqu'île de Split et de l'île de Čiovo.

des eaux chargées du matériel terrigène transporté de l'arrière-pays par le réseau des connexions souterraines. En période d'inactivité de la source ce matériel se dépose sur ses bords sur le fond sous-marin.

A propos des signes topographiques utilisés pour les sources sous-marines, il convient de signaler que, jusqu'à présent, sur diverses cartes elles étaient désignées comme les sources de terre ferme par un cercle, un cercle en trait plus gras et un autre plus fin à l'intérieur, ou par un cercle portant une virgule à sa partie inférieure. Etant donné qu'il s'agit d'une source qui n'apparaît qu'en mer, il est nécessaire de préciser que c'est une source sous-marine, jaillissement spécifique d'eau douce dans la mer. Il convient donc de les désigner par un signe spécial. Nous faisons aussi cette remarque, car le Bureau Hydrographique International de Monaco a adopté, depuis peu, un signe spécial pour les sources sous-marines. Ce signe le plus récent d'après la décision de cette institution, doit être représenté par une brève ligne pointillée horizontale à partir de laquelle s'élèvent deux lignes pointillées incurvées en forme de jet (A n o n y m u s, 1956); il est représenté sur la figure N° 1.

La baie de Kaštela est la plus vaste de la côte de la Dalmatie moyenne. Elle est bornée au Sud par l'île de Čiovo, au Nord par les pentes du Massif du Kozjak qui s'abaissent vers la mer dans la fertile campagne de Kaštela, à l'Est par la presqu'île de Split, et à l'Ouest par la terre ferme et l'île de Čiovo qui se touchent presque.

Quant à la structure géologique de cette région, elle est caractérisée par des strates paléogènes qui forment la presqu'île de Split et la côte septentrionale de la baie de Kaštela, alors que l'arrière-pays dans le massif montagneux du Kozjak est en calcaire crétacé, de même que l'île de Čiovo (fig. N° 2).

Les investigations ont eu lieu à trois stations de prélèvement dans la baie de Kaštela. La station N° 1 est la station centrale représentative pour cette baie, et est située en dehors de la région des sources sous-marines. La station N° 2 est située sur l'emplacement même de la source sous-marine près de Divulje («Vrulja» I) et la station N° 3 sur le point d'émergence de la source sous-marine près de Slatine («Vrulja» II). Les stations de prélèvement mentionnées sont situées par les coordonnées géographiques suivantes:

Station N° 1	$\varphi = 43^{\circ}$	31'	30" N
	$\lambda = 16^{\circ}$	22'	30" E
Station N° 2	$\varphi = 43^{\circ}$	31'	07" N
	$\lambda = 16^{\circ}$	18"	38" E
Station N° 3	$\varphi = 43^{\circ}$	30'	39" N
	$\lambda = 16^{\circ}$	20'	14" E

a) Caractéristiques bathymétriques

Les recherches bathymétriques aux stations de travail, ont abouti à des résultats différents. A la station N° 1, la profondeur est de 39 mètres et elle fait partie de la région uniforme, plate, et en même temps la plus profonde de la baie de Kaštela alors que les profondeurs dans les parages des sources

— stations N° 2 et N° 3 — varient à de très faibles distances. Les résultats des examens bathymétriques sous-marins par enregistrements échographiques ont révélé une répartition identique des profondeurs dans les sources I et II, et qui se présente ainsi:

Le fond sous-marin, en avant et en arrière de la source située près de Divulje est complètement plat et mesure 15 mètres de profondeur. Au point d'émergence de la source le fond de la mer s'abaisse brusquement sous un angle très grand jusqu'à la profondeur maxima de 35 mètres pour remonter ensuite aussi brusquement sous le même angle jusqu'à 15 mètres. Les enregistrements échographiques de la source d'eau douce près de Slatine — qui est d'ailleurs assez éloignée de celle des environs de Divulje — ont indiqué une répartition presque identique des profondeurs. A cette source, la profondeur de 15 mètres passe sans transition jusqu'à 32 mètres d'où le fond sous-marin se relève de nouveau jusqu'à 15 mètres et se continue en un plateau de profondeur uniforme entourant la source de toutes parts. Nous avons donc obtenu le même aspect bathymétrique à la source I et à la source II.

Des différences semblables dans la bathymétrie des sources sous-marines d'eau douce sont aussi connues de la Méditerranée pour diverses régions où de telles recherches ont été faites. Dans le golfe de Taranto, par exemple, à l'occasion de mesures faites dans les sources (Cerruti, op. cit.) on a remarqué que des mouvements presque insignifiants du bateau d'où l'on descendait le plomb de sonde ont indiqué des différences sensibles de profondeur.

b) Caractéristiques morphologiques

Pour l'étude morphologique des sources sous-marines on a eu recours à la méthode combinée d'enregistrement ultra-soniques et de reconnaissances directes du fond sous-marin par l'équipe des plongeurs.

En vue de ces recherches on a disposé sur chaque source quatre profils orientés: N — S, E — W, NW — SE et NE — SW; les points extrêmes de ces profils, marqués par des flotteurs, avaient été déterminés par les coordonnées géographiques suivantes: (voir la page 11 et 12)

Les résultats de l'étude morphologique des sources sous-marines par enregistrements échographiques ont montré que la répartition des profondeurs — qui sert de base à l'interprétation morphologique — se répète presque toujours sur tous les profils explorés des sources I et II. Il est donc intéressant de constater que les enregistrements échographiques des sources sont identiques pour chaque profil et que l'aspect morphologique, transversal, longitudinal et diagonal du profil de la source près de Divulje présente une analogie complète avec l'aspect morphologique de la source des environs de Slatine.

Les caractéristiques morphologiques du fond sous-marin dans la région d'émergence des sources sont vérifiées et contrôlées par des reconnaissances sub-aquatiques de l'équipe des plongeurs, ceux-ci prenant aussi des mesures

Station N° 2 — Source près de Divulje

I profil N—S	N			S		
	$\varphi = 43^\circ$	31'	16'' N	$\varphi = 43^\circ$	31'	02'' N
	$\lambda = 16^\circ$	18'	40'' E	$\lambda = 16^\circ$	18'	40'' E
II profil SW—NE	SW			NE		
	$\varphi = 43^\circ$	31'	05'' N	$\varphi = 43^\circ$	31'	11'' N
	$\lambda = 16^\circ$	18'	32'' E	$\lambda = 16^\circ$	18'	44'' E
III profil E—W	E			W		
	$\varphi = 43^\circ$	31'	08'' N	$\varphi = 43^\circ$	31'	07'' N
	$\lambda = 16^\circ$	18'	50'' E	$\lambda = 16^\circ$	18'	32'' E
IV profil NW—SE	NW			SE		
	$\varphi = 43^\circ$	31'	14'' N	$\varphi = 43^\circ$	31'	05'' N
	$\lambda = 16^\circ$	18'	34'' E	$\lambda = 16^\circ$	18'	44'' E

avec leur profondimètre. Les reconnaissances sous-marines et le contrôle de la profondeur ont confirmé l'aspect morphologique trouvé au détecteur ultrasonique.

De l'examen des enregistrements échographiques des sources sous-marines explorées dans la baie de Kaštela, il ressort que le fond sous-marin là où jaillissent les sources sous-marines a la forme d'un entonnoir régulier allongé. Ces excavations en forme de cônes renversés très réguliers correspondent très exactement aux entonnoirs qui sont l'expression morphologique spécifique des terrains karstiques (fig. N° 3 et N° 4).

On sait que, dans une région karstique, certaines formes peuvent se retrouver sur les petits fonds voisins (Andree, 1920). Aussi est-ce dans ce sens que l'on essaye d'interpréter de telles formes qui pourraient peut-être exister dans les endroits où jaillissent les sources. Le phénomène d'émergence de forts courants d'eau douce jusqu'en surface depuis 50 mètres de profondeur dans la baie de Rijeka, près de Mošćenica — décrit par Lorenz (1836) —, est amené en relation avec des formes submergées du fond sous-marin par Andree (op. cit.) qui mentionne l'éventualité de leur enfoncement ultérieur.

Les différences sensibles de profondeur constatées entre les sources du golfe de Taranto (Cerruti, op. cit.) — quoique des mesures morphologiques précises n'aient pas été effectuées — peuvent, cependant, laisser pressentir certaines particularités morphologiques du fond sous-marin dans la zone d'émergence des sources de ce golfe.

Station N° 3 — Source près de Slatine

I profil N—S	N				S			
	$\varphi = 43^\circ$	30'	44''	N	$\varphi = 43^\circ$	30'	33''	N
	$\lambda = 16^\circ$	20'	16''	E	$\lambda = 16^\circ$	20'	14''	E
II profil NE—SW	NE				SW			
	$\varphi = 43^\circ$	30'	46''	N	$\varphi = 43^\circ$	30'	37''	N
	$\lambda = 16^\circ$	20'	19''	E	$\lambda = 16^\circ$	20'	10''	E
III profil NW—SE	NW				SE			
	$\varphi = 43^\circ$	30'	46''	N	$\varphi = 43^\circ$	30'	36''	N
	$\lambda = 16^\circ$	20'	12''	E	$\lambda = 16^\circ$	20'	19''	E
IV profil E—W	E				W			
	$\varphi = 43^\circ$	30'	39''	N	$\varphi = 43^\circ$	30'	40''	N
	$\lambda = 16^\circ$	20'	20''	E	$\lambda = 16^\circ$	20'	06''	E

L'interprétation de la structure morphologique des sources sous-marines de la baie de Kaštela — si l'on s'en rapporte aux enregistrements échographiques — indique l'existence certaine d'entonnoirs fossiles, ce que confirment d'autre part les reconnaissances sous-marines faites par les plongeurs.

Les levés morphométriques que ceux-ci ont effectués concordent entièrement avec les résultats fournis par les échogrammes. C'est ce qui a permis de repérer la bordure rocheuse des excavations en entonnoirs, recouverte à sa surface seulement, et sur le plus large périmètre de l'ouverture de l'entonnoir, par des sédiments sableux. Cette découverte, fait grâce aux reconnaissances sous-marines directes, exclut la possibilité d'envisager le modelage de formes rocheuses en entonnoirs — dans les conditions récentes — sur le fond sous-marin par le passage d'eaux souterraines à travers des sédiments de sable meuble en période d'activité des sources. Il est donc impossible d'admettre le modelage d'une excavation en entonnoir dans des sédiments sableux par érosion des eaux souterraines. Mais, par contre, l'existence d'entonnoirs de composition lithologique dure, avec orifice dans le fond, plaide en faveur de l'existence d'entonnoirs submergés sur le fond sous-marin de la baie de Kaštela (fig. N° 5).

Ceci indiquerait donc que les entonnoirs submergés, formés au cours de la phase continentale de cette région, alors qu'un synclinal de flysch — comme une forme du poléorelief de l'âge prédiluvial — reliait le massif du Kozjak à l'île de Čiovo. D'accord avec la genèse du bassin adriatique, une transgression

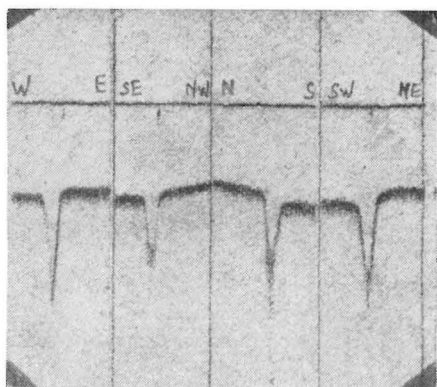


Fig. 3. Structure morphologique de la source sous-marine, près de Divulje (Station No. 2)

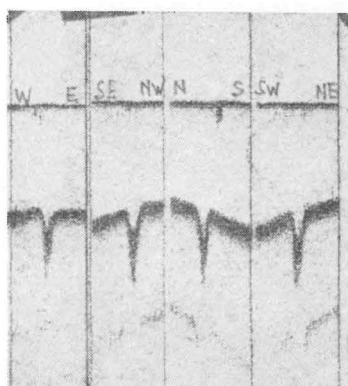


Fig. 4. Structure morphologique de la source sous-marine, près de Slatine (Station No. 3)

marine postdiluviale a envahi la baie dans laquelle s'effectue de façon constante, dans les conditions récentes, le dépôt des sédiments marins. C'est ainsi que les entonnements, en tant qu'expression de la plastique karstique de l'ancien continent, ont été submergés et font fonction de sources sous-marines.

On observe aussi un phénomène analogue d'entonnoirs submergés au fond du lac de Skadar dont quelques uns sont devenus des sources, alors qu'au fond du bassin des lacs d'Ohrid et de Prespa, on trouve certaines dépressions en forme de «dolines» karstiques. On pourrait donc comparer les caractéristiques morphologiques du paléorelief karstique de la phase prédiluviale-continentale de la ceinture côtière avec la plastique karstique de la phase prélimnique des lacs mentionnés.

Les entonnements submergés, constatés, d'où jaillissent les sources de la baie de Kaštela peuvent être considérés comme l'un des éléments des particularités géomorphologiques du relief sous-marin de la région étudiée. Considérées sous cet aspect, de telles formes du relief sous-marin ne font que confirmer l'intérêt qu'il y aurait à appliquer la méthode géomorphologique qui, associée aux autres méthodes (stratigraphique-paléontologique, historiographique et maréographique) sert à interpréter et à confirmer le mouvement de la ligne côtière sur le littoral oriental de l'Adriatique. Par ce déplacement, la baie de Kaštela — jadis campagne karstique sur le synclinal de flysch — a été aussi envahie par une transgression marine avec ses entonnements déjà développés et formés.



Fig. 5. Photographie sub-aquatique de l'entonnoir fossile submergé, à 34 m de profondeur, à travers lequel par une ouverture de 2 m de longueur, jaillit la source sous-marine, près de Slatine (Station No. 3)

c) Structure hydrologique

La connaissance de la structure hydrologique des sources sous-marines présente un haut intérêt pour l'étude de la circulation des eaux souterraines dans la zone côtière du karst dinarique littoral. Le problème de l'influence des eaux souterraines sur la structure hydrologique des sources n'a pourtant pas encore été abordé en Adriatique avec l'idée de suivre de façon continue leurs caractéristiques hydrologiques au cours d'une année hydrologique.

La baie de Kaštela, en ce qui concerne les caractéristiques hydrographiques, a été assez bien étudiée et sur ce sujet on a recueilli des données suffisantes (Buljan et Marinković, 1956 — Zore et Zupan, 1960). Mais ces recherches n'ont pas porté sur la structure hydrologique des sources sous-marines de cette baie, à tous les niveaux et en toutes saisons, sauf pour ce qui est de février 1950.

Après des recherches hydrographiques préliminaires sur les sources sous-marines de la baie de Kaštela au cours de quatre saisons de mesures, entre 1956 et 1960 (Alfirević, 1963) on a commencé à suivre leurs fluctuations annuelles de température et de salinité pendant une année hydrologiques. Les investigations se sont poursuivies régulièrement, chaque mois, entre septembre 1963 et août 1964, et les données obtenues ont permis de confronter la structure établie des sources sous-marines et les caractéristiques hydro-

Tableau I
Activité des sources sous-marines

Date de l'observation	Source près de Divulje (Station N° 2)	Source près de Slatine (Station N° 3)
14. IX 1963.	inactive	inactive
22. X 1963.	inactive	inactive
20. XI 1963.	inactive	inactive
18. XII 1963.	active	active
15. I 1964.	active	active
22. II 1964.	active	active
14. III 1964.	active	active
16. IV 1964.	active	active
18. V 1964.	inactive	inactive
15. VI 1964.	inactive	inactive
15. VII 1964.	inactive	inactive
15. VIII 1964.	inactive	inactive

graphiques de l'eau de la baie de Kaštela, hors de leur zone d'influence. C'est précisément pour cette raison que les stations de prélèvement ont été situées de manière à ce que la station N° 1 représente la partie de la baie de Kaštela non soumise à l'influence des eaux souterraines, et les stations N° 2 et N° 3 localisées aux points de résurgence des eaux souterraines dans la baie de Kaštela à travers les sources sous-marines.

La structure hydrologique des sources sous-marines est certainement soumise aussi à l'influence de leur activité, ou de leur inactivité, au cours des saisons diverses, qui, elles, sont caractérisées par l'abondance ou l'absence de précipitations. Aussi le tableau I nous donne-t-il un aspect de l'activité des sources au cours des recherches, afin qu'on puisse les considérer en relation avec leurs propriétés hydrographiques. (voir la page 15)

En ce qui concerne les précipitations qui caractérisent la région de Split et les territoires adjacents, nous avons utilisé les données des archives du département de la Marine de l'Institut Hydrométéorologiques de S. R. H. (République Socialiste de Croatie) Split, ce qui nous permet de suivre leur influence sur les propriétés hydrographiques des sources sous-marines. On a pris en considérations l'allure saisonnière des précipitations, mois par mois, pendant toute la durée des recherches (IX 1963 — VIII 1964), ainsi que la moyenne mensuelle — calculée sur une longue suite d'années — de l'allure des précipitations entre 1925 et 1956., (avec interruption de 1941 à 1945.), ce qui figure dans le tableau suivant: (voir la page 17)

Les caractéristiques hydrographiques des sources sous-marines (stations N° 2 et N° 3), comparées à celles de l'eau de la baie de Kaštela (station N° 1) peuvent être suivies dans le tableau ci-joint à travers les fluctuations annuelles de température et de salinité dans la structure de 0 à 30 mètres (tableau III). Il ressort de l'analyse des données de température et de salinité des sources sous-marines et de la zone hors de leur influence que la structure hydrologique de ces régions, dans la baie de Kaštela, montre, en période d'activité des sources, des différences essentielles qui disparaissent en période d'inactivité.

Température

Considérant les résultats obtenus par des mesures de température à des niveaux différents et aux diverses saisons de l'année on peut — en ce qui concerne la stratification des températures — d'après les aspects saisonniers observer les caractéristiques suivantes:

a) période automnale — durant cette période, les sources se comportent comme l'eau de la baie de Kaštela. En surface on trouve de l'eau plus froide et au fond de l'eau plus chaude, mais sans différences extrêmes bien accusées. Décembre fait exception, quand l'écart de température entre les eaux superficielles plus froides et les eaux profondes plus chaudes à la station N° 1 est plus grand (surface: 12,9° C — fond 15,5° C) alors que l'homothermie s'installe dans les sources. En fin d'arrière-saison, les sources sont, dans les couches d'eau voisines du fond, à 30 mètres, plus froides que les eaux de baie de Kaštela,

Tableau II
Aperçu de l'allure des précipitations
pour la région de Split et les territoires adjacents

Mois	Allure saisonnière des précipitations en 1963/1964.	Moyenne pluriannuelle de l'allure des précipitations entre 1925. et 1956.
IX	62,1	69
X	34,5	102
XI	86,7	113
XII	189,8	118
I	2,5	69
II	57,6	65
III	173,5	54
IV	51,9	51
V	28,1	64
VI	47,4	45
VII	18,3	24
VIII	38,8	35

(La moyenne annuelle des précipitations pour la région étudiée s'établit
à 809 mm.)

alors qu'en surface, grâce à l'homothermie, elles sont plus chaudes que les eaux de la baie de Kaštela.

b) période hivernale — pendant cette période, les sources diffèrent sensiblement de l'eau de la baie de Kaštela. L'homothermie s'y installe, alors qu'à la station N° 1 une différence de température entre les eaux superficielles et profondes se fait nettement sentir. Cette différence est particulièrement sensible en janvier, époque où les eaux de la baie de Kaštela sont plus froides en surface (12,3° C), et plus chaudes au fond (15,5° C). Ce rapport est en accord avec ce qu'on a constaté en décembre, ce qui signifie que les sources ont conservé en hiver l'homothermie de l'automne tardif; les différences marquées entre la température des eaux superficielles et profondes, dans la baie de Kaštela, sont aussi identiques à celles notées en fin d'automne. Durant toute la période hivernale, dans les couches d'eau voisines du fond — de 20 mètres

jusqu'au fond — les sources sont plus froides que les eaux de la baie de Kaštela. La cause en est certainement dans la grande quantité de précipitations atmosphériques ayant provoqué une arrivée plus abondante d'eaux souterraines dans les sources de la baie de Kaštela. Du fait de l'homothermie les sources sont plus chaudes en surface que les eaux de la baie de Kaštela, qui continue à conserver la stratification des températures, normale pour cette période (eaux superficielles plus froides, eaux profondes plus chaudes).

c) période printanière — pendant cette période les sources sous-marines se comportent de nouveau comme l'eau de la baie de Kaštela. Mais, à la différence de la période automnale, l'eau superficielle est plus chaude et l'eau profonde plus froide avec de fortes différences extrêmes. On trouve, cependant, une exception en avril: alors que les eaux de la baie de Kaštela accusent une différence minimale de température entre la surface et le fond, la source près de Divulje conserve encore l'homothermie, et, dans la source des environs de Slatine, l'eau profonde est légèrement plus chaude que l'eau superficielle. Au cours du printemps, les sources sont habituellement plus chaudes dans les couches d'eau près du fond — de 20 mètres jusqu'au fond — que les eaux de la baie de Kaštela, alors qu'en avril leurs températures s'égalisent presque. Une plus faible intensité de l'activité des eaux souterraines conditionne aussi dans les sources sous-marines, ainsi que dans la baie de Kaštela, la formation de stratifications de températures normales, caractéristiques à cette époque de l'année pour les eaux côtières (eaux superficielles plus chauds, eaux profondes plus froides).

d) période estivale — pendant cette période, du point de vue des rapports des températures, les sources s'égalisent avec l'eau de mer de la baie de Kaštela, et on y observe la stratification normale des températures qui caractérise la saison d'été (eau superficielle plus chaude, eau profonde plus froide). En comparant les eaux, superficielles et profondes, des sources avec celle de la zone hors de leur influence on constate que les eaux, superficielles et profondes, sur l'emplacement des sources sont légèrement plus tièdes que les eaux, superficielles et profondes, à la station N° 1, considérée comme la station témoin de l'eau de la baie de Kaštela.

De l'analyse des températures dans la structure hydrologique des sources et de l'eau de la baie de Kaštela, ressort la possibilité de distinguer deux périodes principales nettement tranchées: a) une période hivernale englobant aussi la fin de l'automne et le début du printemps, et b) une période estivale englobant la fin du printemps et le début de l'automne. Les différences essentielles et les caractéristiques spécifiques qui marquent ces périodes sont les suivantes:

Période hivernale:

1. — une homothermie s'est installée dans les sources et, dans la baie de Kaštela, l'eau superficielle est plus froide et l'eau profonde plus chaude (XII^e, I^{er} et II^e mois);

2. — en période d'activité, l'eau superficielle des sources est plus chaude et l'eau profonde plus froide que dans la baie de Kaštela. On a noté aussi, au cours de cette période, la plus basse température de l'année hydrologique

enregistrée aux stations étudiées, $10,6^{\circ}$ C en février dans la source sous-marine près de Divulje (station N° 2).

Période estivale

1. — Pour ce qui est de la répartition des températures, l'eau des sources est en tous points identique à celle de la baie de Kaštela et présente une stratification des températures normale pour la saison (eau superficielle plus chaude, eau profonde plus froide);

2. -- Les eaux, superficielles et profondes, des sources sont un peu plus tièdes que les eaux, superficielles et profondes, de la baie de Kaštela à la stations N° 1. Durant cette période on a noté aussi la température maximale de l'année hydrologique, $24,4^{\circ}$ C en septembre à la station N° 2 (source des environs de Divulje).

Salinité

L'analyse des résultats de l'étude de la salinité, à des niveaux divers et au cours de différentes périodes de l'année, mettent en évidence les particularités suivantes en ce qui concerne le taux de la salinité:

a) période automnale — Bien que, dans les sources sous-marines et dans la baie de Kaštela, la salinité augmente en fonction de la profondeur, celles-ci, durant cette période, se comportent cependant autrement que les eaux de la baie de Kaštela. Cette différence de comportement se manifeste sous deux aspects. En octobre, à tous les niveaux, les sources sont plus salées, tandis qu'à la fin de l'automne leur taux de salinité est plus bas que celui de l'eau de la baie de Kaštela. Cette plus faible salure dans les sources est amenée en relation avec le début de leur activité.

b) période hivernale — L'écart de salinité entre les sources et les eaux de la baie de Kaštela est le plus grand pendant cette période. L'eau superficielle moins salée et l'eau profonde beaucoup plus salée de la baie de Kaštela représentent le reflet normal de l'état hydrographique des eaux littorales qui subissent le contre-coup du minimum de salinité observé en surface en janvier, alors qu'en Adriatique il apparaît, d'ordinaire, en décembre (Buljan, 1953). Les sources, par contre, montrent un rapport inverse des valeurs de la salinité. Ainsi, par exemple, la source sous-marine, près de Divulje a, au fond, en janvier une eau moins salée qu'aux niveaux compris entre 5 et 20 mètres, tandis que la source près de Slatine accuse, en février principalement, une baisse rapide de la salinité de la surface vers le fond. Les sources sous-marines sont habituellement moins salées que les eaux de la baie de Kaštela, surtout dans les couches profondes, ce qui est une conséquence de l'eau de la baie de Kaštela. Cette plus faible salure dans les sources est amenée en relation avec le début de leur activité.

c) période printanière — L'accroissement de la salinité en fonction de la profondeur est plus accusé pendant cette période qu'en automne, et il est en relation avec le second minimum de salinité qui, dans la baie de Kaštela, a lieu un peu plus tôt que le minimum habituel caractéristique pour le mois de mai. La différence entre les sources et la baie de Kaštela atteint son apogée en avril et se manifeste surtout dans la source près de Slatine.

L'écart de salinité entre l'eau de surface plus salée et l'eau profonde moins salée est extrême dans cette source où l'on a enregistré la plus faible valeur de salinité de l'année hydrologique (20,73‰). Ceci exprime donc aussi le plus clairement l'influence des eaux souterraines précisément pendant cette période.

d) période estivale — L'eau des sources et l'eau de la baie de Kaštela sont également salées, et l'augmentation de la salinité en fonction de la profondeur est particulièrement marquée et se traduit par des différences extrêmes en septembre. A cette époque de l'année, on a aussi noté les plus hautes valeurs de la salinité de l'année hydrologique, tant en surface qu'au fond de toutes les stations explorées. Il est intéressant de constater que l'eau des sources, qui sont pourtant inactives, est moins salée que l'eau de la baie de Kaštela, entre 10 mètres et le fond. On pourrait en conclure — même en période d'inactivité des sources — à l'existence possible d'une activité minimale latente.

Si on analyse la répartition de la salinité dans la structure hydrologique des sources et de la baie de Kaštela, au cours d'une année hydrologique, on peut, comme pour la température, distinguer deux périodes: a) une période hivernale englobant aussi la fin de l'automne et le début du printemps et b) une période estivale comprenant aussi le début de l'automne et la fin du printemps. Les caractéristiques principales de ces périodes sont les suivantes:

Période hivernale:

1. — L'eau de la baie de Kaštela présente une distribution normale de la salinité dont le taux augmente en fonction de la profondeur (eau superficielle moins salée — eau profonde plus salée);

2. — Par contre, l'eau des sources sous-marines présente un rapport inversement proportionnel à la profondeur (eau superficielle plus salée, eau profonde moins salée). Cette particularité se manifeste surtout en février et en avril.

Période estivale:

1. — Les valeurs de la salinité sont identiques et dans la baie de Kaštela et dans les sources sous-marines;

2. — L'eau des sources et celle de la baie de Kaštela sont, d'une façon générale, plus salées et les plus hautes valeurs ont été notées en août. Les sources, dans les couches d'eau profondes, sont moins salées que l'eau de la baie de Kaštela, ce qui peut être l'indice d'une activité minimale.

Les précipitations ainsi que les courants souterrains qui en dépendent exercent une influence décisive sur la formation de la structure hydrologique des sources dans la baie de Kaštela. Les précipitations se manifestent par un jaillissement plus abondant des eaux souterraines en période d'activité, alors que la structure hydrologique elle-même est conditionnée par la basse température et la faible salinité qui font que les sources se différencient de l'eau de la baie de Kaštela. Cette influence peut être discernée sur les graphiques et les diagrammes T — S ci-inclus pour la région étudiée dans la baie de Kaštela.

Ainsi, par exemple, le graphique (fig. 6) montre l'influence de l'allure des précipitations sur la température des eaux profondes dans les sources, ainsi que

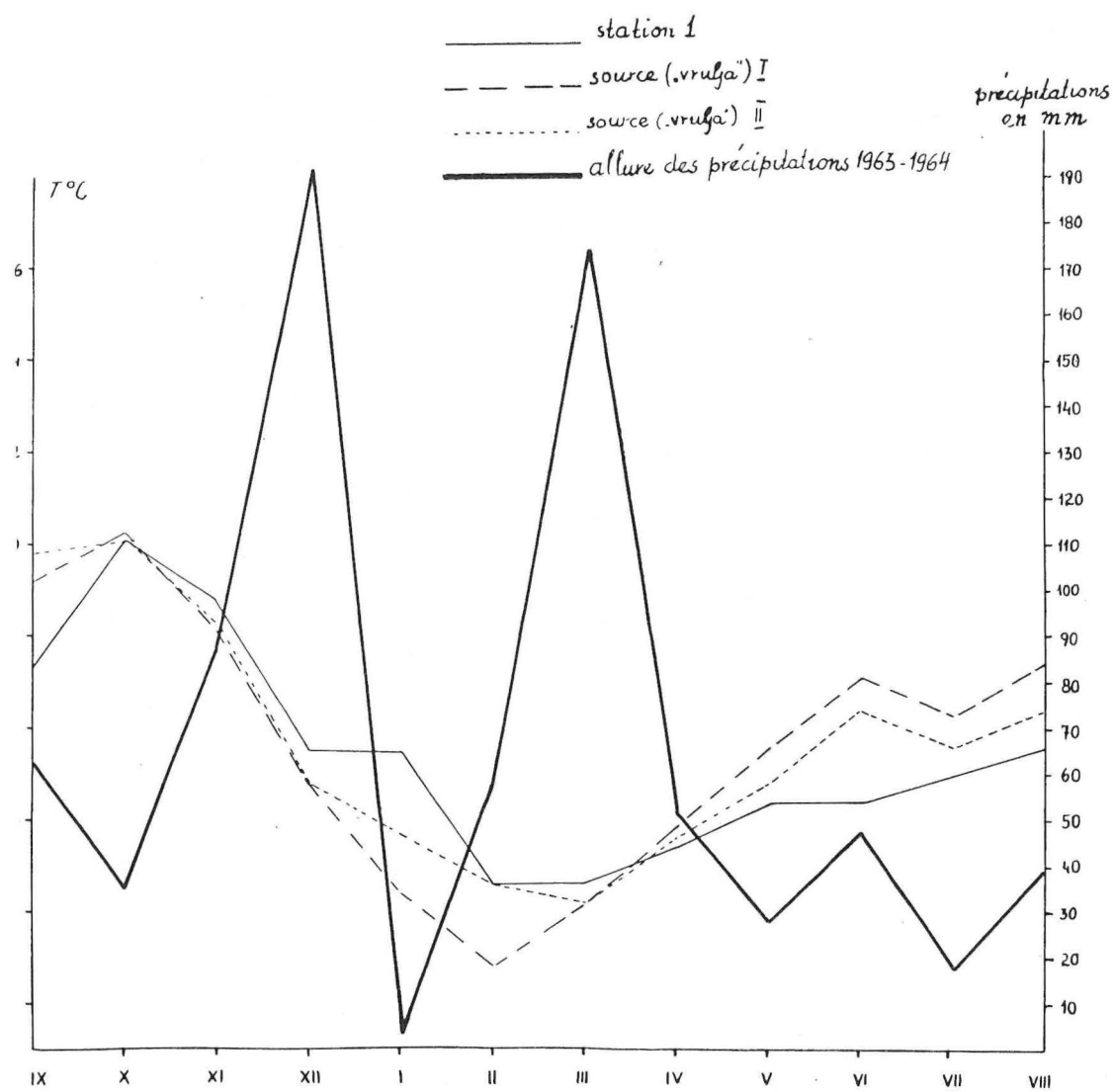


Fig. 6. Relation entre l'allure annuelle des précipitations pour le territoire de Split et la température profonde des stations étudiées.

dans la zone située hors de leur influence. Au cours de l'automne, de l'hiver et au début du printemps, donc d'octobre à avril, l'eau profonde des sources est plus froide que l'eau de mer des couches profondes de la baie de Kaštela, et c'est pendant cette période que nous trouvons les deux maximums de l'allure des précipitations (décembre et mars). Vers la fin du printemps et en été, cette influence ne se faisant plus sentir, entre avril et septembre l'eau du fond des sources est même plus chaude que l'eau de mer à la station N° 1.

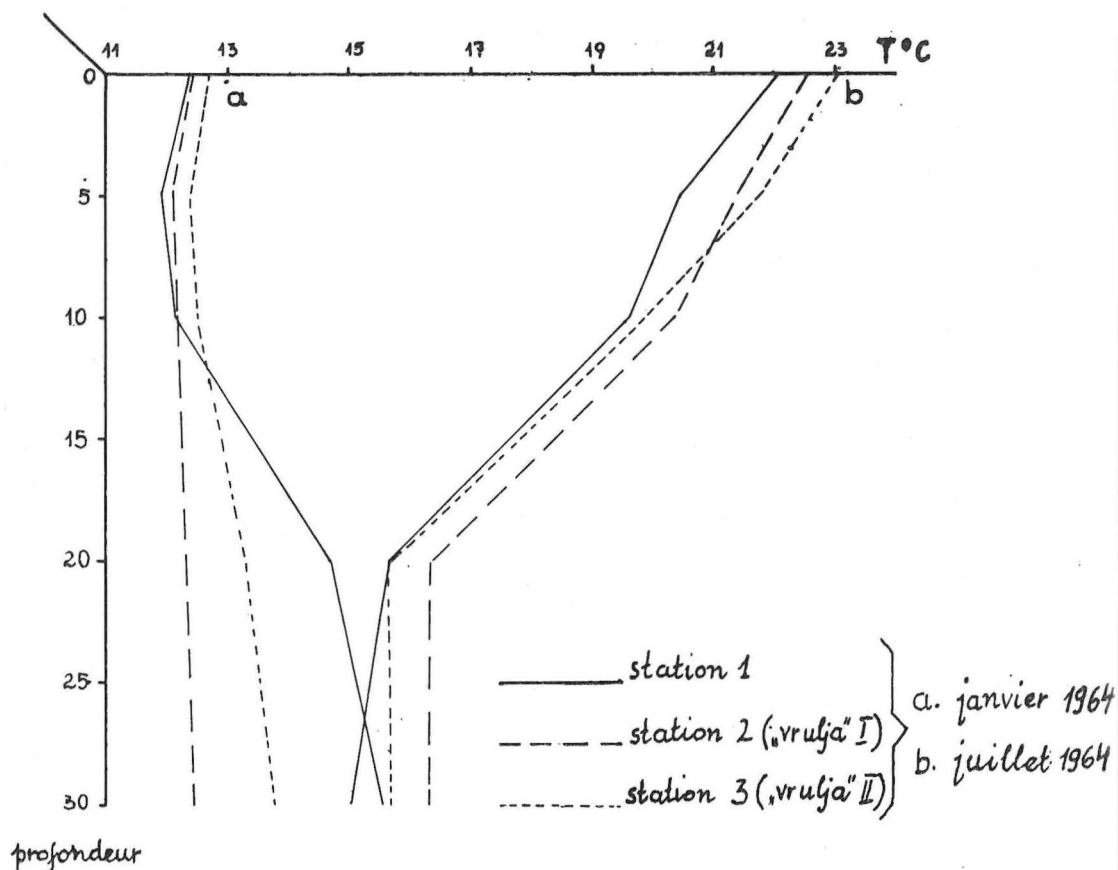


Fig. 7. Distribution verticale de la température, en été et en hiver, aux stations 1, 2 et 3.

L'influence des précipitations s'est manifestée aussi sur l'homothermie, ce qui est prouvé avec le plus de certitude par l'aspect hivernal et estival de la répartition des températures (fig. 7). Alors qu'en été (juillet) la température des sources et celle de l'eau de mer hors de leur influence, se sont complètement égalisées, et présentent une stratification estivale normale des températures (eau de surface plus chaude, eau du fond plus froide), avec thermo-

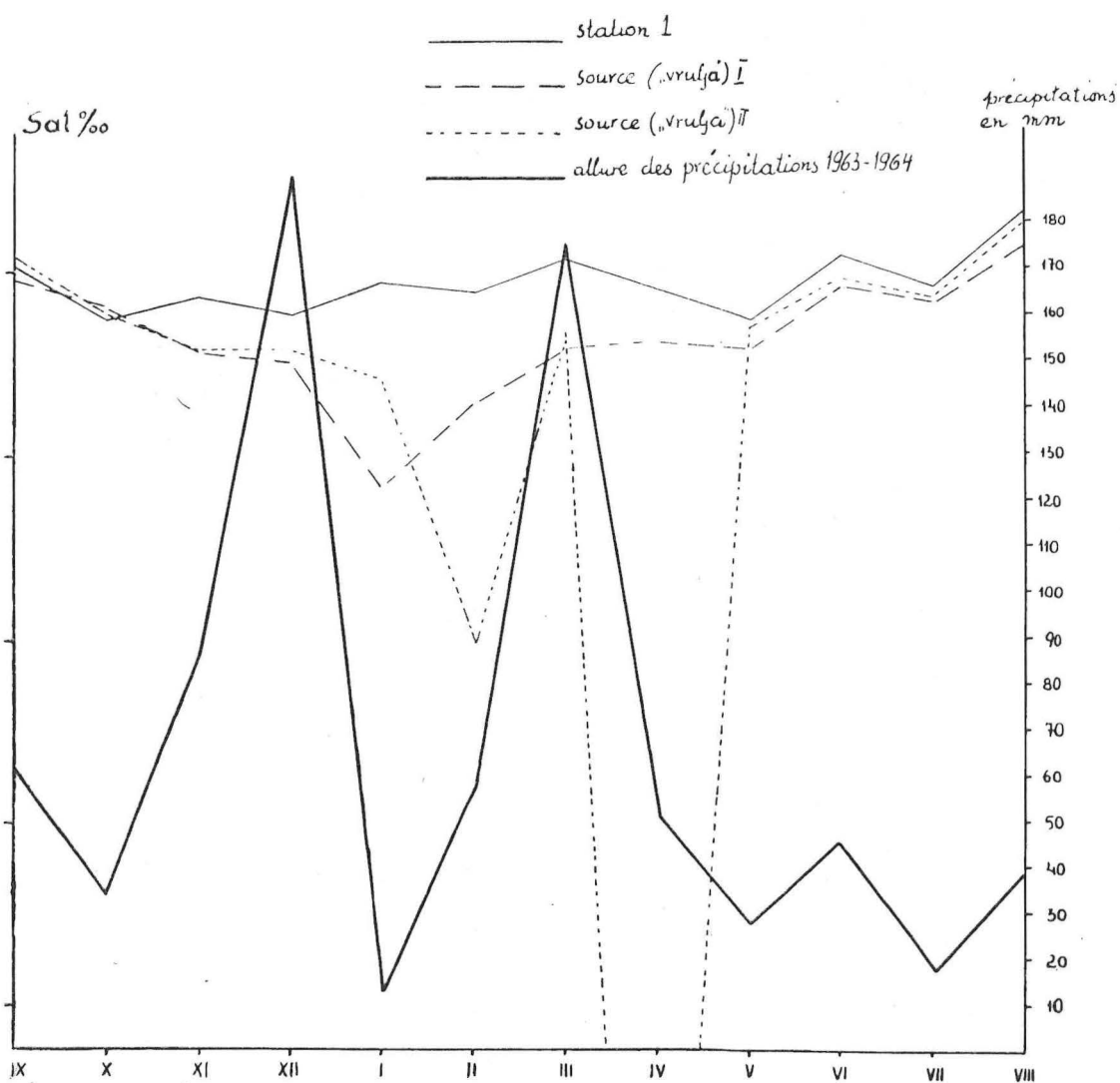


Fig. 8. Relation entre l'allure annuelle des précipitations pour le territoire de Split et la salinité profonde des stations étudiées.

cline, en hiver (janvier), par contre, nous trouvons une homothermie dans les sources tandis que l'eau qui n'est pas sous leur influence présente une stratification hivernale, normale, des températures (eau superficielle plus froide eau profonde plus chaude), avec thermocline également.

En ce qui concerne la répartition des valeurs de la salinité au cours d'une année hydrologique, il est évident que les précipitations influent sur la salinité des eaux profondes dans les sources. Le graphique (fig. 8) montre qu'en période automnale-hivernale, d'octobre à avril, la salinité, au fond des sources, est notablement plus basse que celle de l'eau de mer non soumise à leur influence. Ce fait est en accord avec l'allure des précipitations dont les deux maximums ont lieu en décembre et en mars. En période printanière-estivale, d'avril à septembre, les valeurs de la salinité de l'eau profonde des sources et celles de l'eau du fond de la mer à la station N° 1 sont devenues presque égales. C'est entre février et avril que se manifeste avec le plus de force l'influence des précipitations sur la salinité profonde des sources.

La courbe T—S des valeurs moyennes de température et de salinité pour la région prospectée de la baie de Kaštela traduit aussi les aspects divers de la structure hydrologique des sources et de l'eau de mer en période d'hiver et d'été. Ici, apparaît nettement une « polarisation » dans la courbe T—S, qui est la plus accentuée pendant les mois d'hiver et d'été. A l'époque de l'activité des sources, qui coïncide avec des précipitations abondantes et la saison froide de l'année, la courbe T—S des sources s'écarte sensiblement de la courbe T—S de l'eau de mer et s'est placée dans la région à basses valeurs de température et de salinité. Par contre, les parties supérieures des courbes T—S, qui traduisent la saison chaude de l'année et l'inactivité des sources — donc l'absence de précipitations — se superposent, tant pour les sources que pour l'eau de mer hors de leur influence (fig. 9).

De l'examen de la structure hydrologique de l'eau de la totalité de la région soumise aux investigations, en diverses saisons, à l'aide du diagramme T—S, il ressort que l'eau à basse température et à faible salinité caractérise précisément la période hivernale et printanière et que, présentant une polarisation sur le diagramme T—S, elle s'est placée parmi les basses valeurs de température et de salinité — vers la partie inférieure du graphique et à gauche. Une eau plus chaude et plus salée est caractéristique pour la période d'automne et d'été, et elle se place parmi les valeurs plus élevées de température et de salinité dans la partie supérieure du graphique et à droite (fig. 10).

En comparant le diagramme T—S dans ses aspects saisonniers avec les données hydrographiques des stations étudiées dans la baie de Kaštela, on voit que l'eau à basse température et faible salinité, pendant la période plus froide de l'année, appartient aux sources, et que l'eau de mer, présentant de telles qualités hydrographiques en cette saison de l'année n'est que représentée de façon insignifiante. D'autre part, l'eau à température et à salinité plus élevées pendant la période plus chaude de l'année appartient aux sources et à l'eau de mer hors de leur influence, ce qui confirme qu'à cette époque de l'année, les sources, par leurs qualités hydrographiques, sont presque identiques à l'eau de mer de la baie de Kaštela.

Les caractéristiques de la structure hydrologique des sources et de l'eau de mer de la baie de Kaštela sont donc les suivantes:

Au cours de l'année hydrologique, sous l'influence des précipitations et des eaux souterraines, pendant la période plus froide de l'année, les sources se différencient notablement de l'eau de mer non soumise à leur influence. Cette différence se manifeste dans l'eau profonde des sources plus froide et moins salée. Au cours de la période plus chaude de l'année où les précipitations sont rares ou inexistantes, les sources sont plus chaudes et presque aussi salées que l'eau de mer hors de leur influence, avec laquelle, quant à la structure hydrologique, elles s'égalisent absolument de sorte que la différence qui se manifeste en période plus froide de l'année devient nulle. On peut, d'autre part, conclure que l'eau de mer de la baie de Kaštela, sous l'influence des changements saisonniers, est soumise dans sa structure hydrologique à la dynamique déterminée qui caractérise les eaux côtières. La dynamique dans la structure hydrologique des sources est un peu différente et sous la dépendance directe de la circulation des eaux souterraines dans la zone du karst littoral. La résurgence de ces eaux dans les sources est en relation avec leur activité et l'allure des précipitations qui, en période plus froide de l'année, sont les plus abondantes et, dans l'arrière-pays karstique, contribuent à intensifier la circulation et la résurgence des courants souterrains.

Au cours de ces investigations, qui ont porté sur les sources de la baie de Kaštela, on a pu observer l'apparition de glace au centre même de la baie. Jusqu'à présent, il est arrivé de trouver de la glace en diverses localités à proximité immédiate des côtes, mais, pour la première fois, ces recherches ont permis de constater, à une assez grande distance de la ligne côtière, la présence de glace sous l'influence directe de l'activité intensive des sources. C'est ainsi qu'en février 1959, des glaçons de forme irrégulière, de 2—3 m de diamètre et 1—3 mm d'épaisseur ont fait leur apparition; ils étaient concentrés devant les sources I et II dans la baie de Kaštela.

Dans la zone des glaces on a prélevé un échantillon d'eau de mer composé d'un mélange d'eau et de glace, dont la température était de -1°C , tandis que la salinité de l'eau superficielle s'élevait à 13,13‰. La température minimale de la baie de Kaštela n'étant jamais inférieure à 8°C , on ne pouvait mettre en relation la présence de glace avec le gel de l'eau de mer. Cependant, l'eau de mer présentant dans la zone des glaces de très basses valeurs de la salinité, on peut supposer que, du fait même de l'activité intensive des sources, l'eau superficielle était de l'eau tout à fait douce qui, en hiver, plus légère nappait en surface l'eau de mer plus lourde. Il semble qu'une conjonction de conditions atmosphériques favorables (mer calme), associées à une grande différence de densité aient rendu possible la formation de glace par gel, à la surface de l'eau douce, qui était sans contact plus étroit avec son support — la mer (Zore, 1958).

d) Caractéristiques sédimentologiques et géologiques

On a étudié les caractéristiques sédimentologiques et géologiques du fond sous-marin dans la région explorée. A la station N° 1, représentant la

partie centrale et aussi la plus profonde de la baie de Kaštela, ainsi que dans la région aux alentours immédiats des sources, on a étudié la composition mécanique des sédiments marins récents. La méthode de sédimentation nous a donné les résultats suivants:

Tableau IV

Composition mécanique des sédiments aux stations étudiées

Station	Fraction en %	Texture
N° 1 (partie centrale de la baie de Kaštela)	I 86,14	argile
	II 11,94	
	III 1,27	
	IV 0,78	
N° 2 (région environnant la source I, près de Divulje)	I 1,23	sable
	II 3,81	
	III 13,99	
	IV 80,97	
N° 3 (région environnant la source II, près de Slatine)	I 0,40	sable
	II 1,02	
	III 1,14	
	IV 97,44	

Ainsi que le montre ce tableau, les sédiments de la partie la plus profonde de la baie de Kaštela, à la station N° 1, sont de nature argileuse tandis que ceux de la région des sources, dans la partie occidentale de la baie de Kaštela, sont sableux. Alors que les particules de la fraction I ($<0,01$ mm) sont représentées en masses dans les sédiments argileux, dans les sédiments sableux, en bordure de la source, dominant nettement les particules de la fraction IV (0,1—2,0 mm.).

Les sédiments marins récents qui bordent les entonnoirs submergés, appartiennent donc, par leur texture, au faciès des sables meubles grossiers. L'analyse granulométrique des sédiments ramassés à proximité immédiate des sources, indique que, outre des particules de la fraction IV, on y trouve aussi des éléments «squelettes» comportant des particules de >2 mm.

L'examen microscopique des sédiments a confirmé leur origine terrigène: les arêtes lisses et arrondies des particules indiquent le frottement et le

façonnement d'un matériel apporté de l'arrière-pays continental, ce qui permet de conclure qu'il a été transporté par des cours d'eau souterrains. La »terra rossa« ramassée sur le fond même des sources a la même origine.

Si l'on considère la couverture sédimentologique en bordure des sources, de même que la trouvaille de »terra rossa« dans leur voisinage immédiat, il ressort que les sédiments marins récents des sources diffèrent notablement des sédiments marins environnants de la baie de Kaštela.

Afin d'établir l'âge géologique des roches à travers lesquelles sourdent les sources, on a étudié la composition lithologique et micropaléontologique des échantillons ramassés au fond des sources par les plongeurs à l'aide de charges détonantes.

Les résultats de l'analyse des échantillons des roches constituant les parois des entonnoirs submergés sont les suivants:

Stations N° 2 (source I, près de Divulje) — Dans l'entonnoir submergé de cette source on a établi que, du point de vue lithologique, la roche appartient au calcaire organogène avec microfossiles bien conservés, partiellement précristallisés. La teneur en CaCO_3 est de 96,17%, et le reste est constitué par une substance argileuse brunâtre.

Station N° 3 (source II, près de Slatine) — Les roches de cet entonnoir submergé, par leur composition lithologique, appartiennent au calcaire marneux, bourré de microfossiles — des Foraminifères surtout. La teneur en calcaire s'élève à 75,93%.

Pour étudier la composition micropaléontologique des roches on en a râpé des échantillons composés de parties marneuses et calcaires. Dans les parties calcaires on a déterminé des Foraminifères appartenant aux genres *Nummulites*, *Discocyclus*, *Actinocyclus*, *Globigerina*, *Globorotalia* et *Nodosaria*. D'après la microfaune de Foraminifères identifiés on peut prouver qu'il s'agit de roches de l'âge éocène (fig. 11).

Compte tenu de la composition lithologique et micropaléontologique des roches étudiées provenant des entonnoirs submergés de la baie de Kaštela on a pu prouver que des calcaires marneux éocènes participent à leur structure géologique. Ainsi, les sources de la baie de Kaštela, par la nature stratigraphique des roches qui les constituent, appartiennent à la zone du Flysch éocène qui, dans le synclinal de la baie de Kaštela, à l'époque postglaciaire a été noyé par une transgression et recouvert de sédiments récents.

e) Relations hydrogéologiques et géotectoniques

La résurgence des eaux souterraines dans la baie de Kaštela, se manifestant sous forme de sources, est en relation étroite avec les rapports hydrogéologiques et géotectoniques dans la structure géologique de cette baie et de son arrière pays. Quant à la structure géologique du Massif du Kozjak, de la presqu'île de Split et de l'île de Čiovo qui délimitent la baie de Kaštela et forment son arrière-plan, elle est caractérisée par des strates paléogènes et mésozoïques. La presqu'île de Split et la côte septentrionale de la baie de Kaštela sont formées par des strates paléogènes; l'île de Čiovo et le Massif du Kozjak par des strates mésozoïques derrière lesquels se trouvent des strates triasiques. Les entonnoirs submergés d'où jaillissent les sources sont aussi constitués par des strates paléogènes.

Fig. 11. MICROFAUNE ÉOCÈNE DES FORAMINIFÈRES DU CALCAIRE MARNEUX
PROVENANT DU FOND DE LA BAIE DE KASTELA (STATION No. 3)



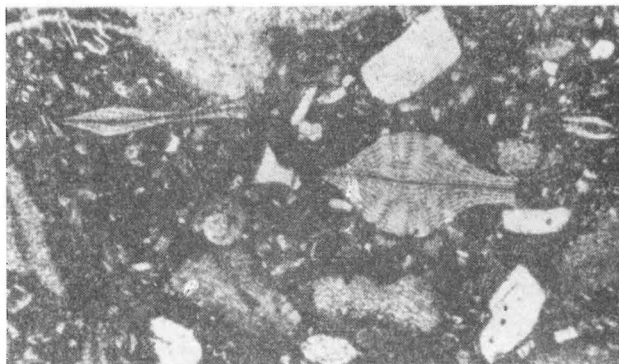
En haut: *Globorotalia* sp. (coupe axiale)

Au milieu: *Discocyclina* sp. (120 x)

En bas: *Globorotalia* sp. (coupe équatoriale)



Nummulites sp. (20 x)



Asterocyclina sp. et *Discocyclina* sp. (30 x)

D'après la carte géologique (Kerner, 1914) et des recherches géologiques plus récentes dans cette région (Šikić, 1957), on a identifié, dans la série stratigraphique des strates, du trias inférieur, du crétacé supérieur et du Flysch éocène. Le trias inférieur est représenté par des marnes argileuses et micassées du Werfen, des grès et des calcaires en dalles; il se développe profondément à l'arrière du Kozjak aux environs de Muć. Les calcaires et les dolomites qui forment le Massif du Kozjak appartiennent aux crétacés supérieurs, alors que l'île de Čiovo est presque entièrement constituée par des calcaires à rudistes. Le Flysch éocène s'étend dans la majeure partie de la ceinture côtière aux alentours de Kaštela et de Split sur la côte nord de la baie de Kaštela où il est représenté par un groupe de roches du Flysch supérieur composées de marnes entre lesquelles s'intercalent des grès, des calcaires, des conglomérats et des brèches à nummulites. Dans ce groupe de roche dominent les grès et les marnes. Les entonnoirs submergés de la baie de Kaštela sont formés de calcaires marneux, alors que sur les falaises abruptes de la côte de Čiovo on trouve deux petits lambeaux de marne du Flysch qui se sont maintenus par voie exclusivement tectonique sur la côte disloquée.

Les masses rocheuses, qui présentent cette composition lithologique, peuvent, du point de vue hydrogéologique être classées en deux groupes principaux: le premier est constitué par les calcaires et les dolomites du calcaire supérieur, perméables à l'eau, tandis que le second comprend du Flysch éocène imperméable, ainsi que des strates werfeniens, des grès et des marnes. La région karstique typique, avec toutes les caractéristiques particulières de son hydrographie, se trouve justement dans les calcaires crétacés supérieurs du Massif du Kozjak, qui sont intercalés entre les strates côtiers paléogènes imperméables et la région imperméable du trias dans l'arrière-pays. L'écoulement des eaux souterraines vers la mer est possible grâce à une conjoncture de conditions favorables: la profonde usure de la zone des calcaires dolomitiques de la région du Kozjak, dont le relief s'élevant jusqu'à 800 mètres crée une pression hydrostatique suffisamment forte, et enfin la répartition particulièrement propice des strates imperméables et perméables dans toute la région.

Les caractéristiques hydrogéologiques des masses rocheuses mentionnées font que les calcaires dégradés et les dolomites supportent les collecteurs hydrogéologiques. D'autre part, le Flysch éocène littoral, faisant fonction d'isolateur hydrogéologique, agit comme une barrière au-dessous de laquelle passent les courants souterrains qui resurgissent en baie de Kaštela sous forme de »vrulje« — sources sous-marines. Ces eaux souterraines, réapparaissant sous les strates paléogènes, jaillissent en mer avec d'autant plus de force que la saison est plus riche en précipitations.

Pendant les périodes d'inactivité des sources on observe un processus opposé à la résurgence des eaux. On a remarqué — comme aussi pour les sources sous-marines du littoral croate (Kuščer, op. cit.) — l'engouffrement de l'eau de mer dans l'orifice des entonnoirs submergés, de sorte que ces sources sous-marines »avalent« l'eau de mer. Lors des reconnaissances subaquatiques effectuées par les plongeurs on a remarqué que des débris de végétation arrachés au fond sous-marin étaient entraînés dans l'ouverture des entonnoirs. Une très forte attraction vers le bas empêchait les plongeurs de

remonter en surface malgré leurs efforts et de s'éloigner du fond de la source. Ce phénomène classe les sources explorées de la baie de Kaštela dans la catégorie des sources karstiques dites »estavela« qui, par un niveau d'eau élevé, sont émissives, et, à bas étiages, sont des gouffres.

Les relations hydrogéologiques de la région explorée, conditionnent ainsi une intense propagation des eaux souterraines dans la zone côtière karstique, dans le secteur de la baie de Kaštela. Ces relations, bien que favorables, ne sont cependant pas encore suffisantes et ne représentent pas la condition fondamentale pour la résurgence des eaux souterraines en terrain karstique. Il a été, en effet, prouvé à l'occasion de recherches hydrologiques dans le karst dinarique que les phénomènes hydrologiques ont forcément une base géologique se manifestant dans les relations tectoniques des régions karstiques (H e r a k, 1957).

Considérant de ce point de vue les relations tectoniques des formations géologiques dans l'arrière-pays hydrologique de la baie de Kaštela, il apparaît que le phénomène de résurgence des eaux souterraines dans les sources sous-marines est, lui aussi, conditionné par des mouvements tectoniques. Dans l'arrière-pays — au sens le plus large — vers le Nord, le long d'une faille fortement inversée les strates werfeniens réapparaissent en surface. Par leur position dans le mur, ils constituent une barrière imperméable qui fait obstacle à l'écoulement des eaux souterraines vers le Nord. Aussi, ces réseaux souterrains gravitent — ils vers la partie centrale de cet arrière-pays formé par les roches dolomites-calcaires du Massif du Kozjak. Les strates paléogènes de la région côtière, par leurs relations tectoniques envers les strates du crétacé supérieur de cet arrière-pays, constituent aussi au Sud une barrière imperméable.

Les strates paléogènes, par leur position stratigraphique, ne peuvent jouer un rôle d'une certaine importance et former une barrière imperméable que s'ils présentent des caractéristiques tectoniques bien marquées s'exprimant par une faille inversée ou un charriage (H e r a k, op. cit.). Et précisément, sur la côte septentrionale de la baie de Kaštela, les strates paléogènes, du fait de la faille inversée, jouent un rôle hydrogéologique de premier plan, les eaux ne pouvant s'écouler que vers le Sud en contournant cette barrière paléogène.

La constatation de l'existence de strates éocènes sur le fond sous-marin de la baie de Kaštela, dans les parages des entonnoirs submergés, indique qu'on peut trouver une ligne de dislocation au milieu de cette baie. Les eaux souterraines, après avoir passé sous la barrière du Flysch éocène dans la zone côtière ressortent sous forme de sources sur le fond sous-marin, à l'endroit précis où le paléogène est disloqué. L'aspect morphologique des sources sous-marines qui s'exprime sous forme d'entonnoirs submergés confirme l'existence de cette ligne de dislocation. Dans la zone karstique, les entonnoirs se forment dans les terrains tectoniquement prédisposés. Les entonnoirs fossiles de la baie de Kaštela sont donc apparus pendant sa phase continentale dans cette partie du karst littoral dans des conditions tectoniques favorables. Les sources deviennent de ce fait l'indicateur de phénomènes tectoniques.

Les investigations, effectuées jusqu'à présent, ont confirmé que les émissions de gaz venant du fond sous-marin dans la région des eaux côtières de

l'Istrie occidentale sont conditionnées par la ligne de dislocation du fond sous-marin le long de laquelle le pliocène marin submergé est en contact avec les strates crétacées qui bordent la presqu'île d'Istrie (Alfirević, inédit). Les émanations d'hydrocarbures à travers le fond sous-marin sont donc interprétées comme l'indicateur d'une ligne de dislocation passant par cet endroit. Des examens complexes, morphologiques, hydrogéologiques et géotectoniques des sources sous-marines de la baie de Kaštela ont confirmé que les »vrulje« peuvent aussi traduire des rapports et des phénomènes tectoniques dans le cadre du complexe hydrologique de circulation des courants souterrains dans la région du karst littoral.

La structure géologique, les caractéristiques hydrogéologiques, des masses rocheuses, ainsi que leurs relations géotectoniques dans l'arrière-pays immédiat présentent donc une signification décisive pour la résurgence des eaux souterraines dans la baie de Kaštela. Le rôle hydrogéologique du Flysch éocène dans le modelage des sources sous-marines explorées de cette baie tire aussi son origine de telles relations géotectoniques.

f) Origine des eaux souterraines

Afin d'établir avec certitude l'existence d'une communication souterraine entre les sources sous-marines de la baie de Kaštela et son arrière-pays hydrologique, on a entrepris des recherches sur la liaison du système des objectifs hydrogéologiques dans cette région.

Partant du fait que les sources par leur fonction hydrologique — émission et engouffrement des eaux — correspondent aux »estavela«, on a entrepris ces recherches pendant les saisons où elles sont inactives.

En ce qui concerne l'engouffrement de l'eau dans les sources, en période d'inactivité, on a essayé de vérifier la force d'attraction descendante observée auparavant. Pour cela on a fait des essais de coloration à la fluorescéine dans l'entonnoir submergé de la source près de Divulje (Station N° 2), qui est la plus près de la source de terre ferme de Pantan, aux environs de Divulje.

Ces expériences ont donné les résultats suivants:

Coloration à la fluorescéine

On a procédé, au total, à dix essais de coloration dans l'espace de sept jours en 1963 et 1964, avec l'assistance d'une équipe de plongeurs munie de huit kilos de fluorescéine. Les expériences de coloration, associées à des reconnaissances sous-marines des plongeurs, avaient été préparées de façon à être réalisées dans les meilleures conditions atmosphériques et en période d'inactivité des sources sous-marines. Elles ont donc eu lieu le 14. IX et le 23. X 1963, puis le 11. VIII, le 12. VIII, le 13. VIII, le 15. VIII et le 28. VIII 1964.

Pour l'expérience du 14. IX 1963. on n'a pas utilisé toute la quantité prévue de fluorescéine mais une seule bouteille d'1 kg de colorant. Après avoir fendu au couteau la toile imperméable entourant le bouchon, on a cassé la bouteille sur la bordure rocheuse du fond de l'entonnoir et on en a versé le contenu dans l'orifice de l'entonnoir sur le fond même. Pendant l'essai de coloration on n'a pas observé de signes d'attraction descendante. Après un certain temps on a procédé à une reconnaissance de contrôle du fond de l'entonnoir pour se rendre compte de l'extension et de l'aspiration du colorant. On a constaté

la coloration du fond en entonnoir de la source de 26 jusqu'à 32 mètres. N'ayant pas remarqué de signes certains d'aspiration on a renoncé à tenter l'expérience avec la dose complète de 8 kg de fluoréscéine, d'autant plus qu'au fond de l'entonnoir la visibilité était très faible. La visibilité étant très mauvaise, le second essai de coloration du 23. X 1963. n'a pu être tenté.

Les expériences de coloration prévues pour 1964 n'ont pas eu lieu non plus, étant donné la très mauvaise visibilité. On a procédé à cinq reconnaissances sub-aquatiques de l'entonnoir submergé à la station N° 2 (source sous-marin près de Divulje) afin d'étudier les possibilités et les conditions de coloration. La visibilité défectueuse et les très faibles signes d'absorption ne garantissaient pas que toute la quantité nécessaire de colorant (8 kg) serait entraînée dans l'ouverture de l'entonnoir — sur le fond sous-marin —, donc la possibilité de prouver expérimentalement la connexion des sources sous-marines avec l'arrière-pays. Il n'a donc pas été possible d'employer la méthode exacte de coloration qui aurait permis de retrouver la trace du colorant dans la source de terre ferme «Pantan», près de Divulje.

Bien que de grands efforts aient été accomplis — nombreuses sorties sur le terrain, liées à ces recherches, toute une série de reconnaissances et de vérifications subaquatiques — les résultats obtenus n'ont pas donné satisfaction.

CONCLUSIONS

Dans le cadre des recherches sur les sources sous-marines d'eau douce en Adriatique, et sur la circulation des eaux souterraines — dont elles sont tributaires — dans la région du karst littoral, on a entrepris, pour la première fois dans cette mer, une étude complète des sources sous-marines de la baie de Kaštela. Les résultats auxquels on a abouti représentent une contribution à la connaissance de leur morphogénèse, de leur structure hydrologique, de leur hydrogéologie et des relations géotectoniques.

L'exploration et l'étude des sources sous-marines de la baie de Kaštela ont permis de constater ce qui suit:

L'aspect morphologique des sources correspond aux entonnoirs fossiles submergés, qui ont pris forme pendant la phase continentale du karst dinarique littoral. On suggère que ce phénomène peut être traité comme une contribution à la méthode géomorphologique en vue de confirmer l'existence d'une transgression marine post-diluviale sur la côte orientale de l'Adriatique.

La structure hydrologique des sources est soumise à l'influence directe des précipitations ainsi que la circulation plus intensive des eaux souterraines qui en dépendent et qui resurgissent dans les sources sous-marines étudiées. Au cours d'une année hydrologique, on a établi deux périodes de temps pendant lesquelles les sources — par leurs caractéristiques hydrologiques — se différencient de l'eau de mer de la baie de Kaštela ou s'identifient avec celle-ci. En période hivernale, les sources présentent une homothermie et de basses valeurs de la salinité qui, dans des conditions météorologiques exceptionnelles, conditionnent l'apparition de glace du large de la baie. En période estivale, ces caractéristiques spécifiques de leur structure hydrologique disparaissent.

Les sédiments de la région environnant les sources, par leurs caractéristiques texturales — sédimentologiques se différencient également de la couverture sédimentologique de la baie de Kaštela. Sur le rebord des entonnoirs submergés se dépose un sable grossier à arêtes arrondies d'origine terrigène qui y est transporté par les cours d'eau souterrains en même temps que de la »terra rossa«.

Par leur composition lithologique et micropaléontologique ces entonnoirs noyés appartiennent aux calcaires marneux éocènes et, par leur structure géologique, au synclinal de Flysch de la baie de Kaštela.

Les masses rocheuses de l'arrière-pays hydrologique de la baie de Kaštela présentent des qualités hydrogéologiques telles que, dans leurs relations réciproques, elles jouent le rôle de collecteurs et d'isolateurs. Les calcaires crétacés supérieurs et les dolomites, perméables, occupent une situation centrale dans cet arrière-pays et sont intercalés entre des strates imperméables de la période triasique à l'arrière et les strates paléogènes de la bande côtière. Un relief élevé et une forte pression hydrostatique dans l'arrière-pays hydrologique favorisent la gravitation des eaux souterraines en direction de la mer.

Les relations géotectoniques dans la région étudiée sont d'une importance capitale pour la résurgence des eaux souterraines dans les sources sous-marines de la baie de Kaštela. Les strates werfénien à l'arrière, de même que les strates paléogènes de la ceinture côtière de la baie de Kaštela sont situées, par rapport aux calcaires crétacés supérieurs et aux dolomites, le long de failles inversées. Les entonnoirs submergés, mis en évidence sur le fond sous-marin, peuvent aussi être considérés comme les indicateurs d'une ligne de dislocation le long de laquelle ils se sont formés pendant la phase continentale de cette partie du karst dinarique. Envahis ultérieurement par une transgression marine, et sous l'effet d'une propagation intensive des eaux souterraines, ils font — dans les conditions récentes — fonction de sources sous-marines d'eau douce.

BIBLIOGRAPHIE

- Alfirević, S. 1960: Bases géologiques-tectoniques des sources sous-marines en Adriatique. XVII Assemblée de la CIESM. Rapports et Procès-Verbaux des Réunions, Vol. XV, Fasc. 3, Monaco-Paris.
- Alfirević, S. 1961: Prilog poznavanju morfologije podmorskih vrela — Contribution à la connaissance de la morphologie des sources sous-marines. Drugi jugoslavenski speleološki kongres (II^e Congrès des spéléologues yougoslaves), Zagreb.
- Alfirević, S. 1963: Hydrogeological Investigations of Submarine Springs in the Adriatic. International Association of Hydrogeologists — National Yugoslav Committee, Belgrade Meeting, Summaries of Communications, Belgrade.
- Alfirević, S. 1963: Les rapports hydrogéologiques dans le golfe de Kaštela. Guide pour le voyage d'études. National Yugoslav Committee, Belgrade Meeting, Belgrade.
- Andree, K. 1920: Geologie des Meeresbodens, Leipzig.
- Buljan, M. 1961: Temperature and salinity of the sea water in the neighbourhood of Split. XVII Assemblée de la CIESM. Rapports et Procès-Verbaux des Réunions, Vol. XVI, Fasc. 3, Monaco-Paris.
- Buljan, M. and Marinković, M. 1956: Some data on hydrography of the Adriatic (1946—1951). Acta Adriatica, Vol. VII, No. 12, Split.
- Cerruti, A. 1938: Le sorgenti sottomarine (citri) del Mar Grande e del Mar Piccolo di Taranto. Ann. Ist. Sup. Navale, Vol. VII, Napoli.
- Cerruti, A. 1948: Ulteriori notizie sulle sorgenti sottomarine (citri) del Mar Grande e del Mar Piccolo di Taranto e sulla loro eventuale utilizzazione. Bollettino di pesca, piscicoltura e idrobiologia. Vol. VIII (nuova serie), Fasc. 1, Roma.
- Corroy, G. Gouvernet, C. Chouteau, J. Sivrine, A. Gilet, R. et Picard, J. 1958: Les Résurgences sous-marines de la région de Cassis. Bulletin de l'Institut océanographique de Monaco, No. 1131, Monaco.
- Cvijić, J. 1918: Hydrographie souterraine et évolution morphologique du Karst. Rec. Trav. Inst. Géogr. alpine. (Université de Grenoble), 6, Grenoble.
- Cvijić, J. 1922: Abraziona serija Jadranske obale i epirogenetski pokreti (Série d'abrasions de la côte adriatique et mouvements épirogénétiques). Glasnik Geografskog Društva (Bulletin de la Société Géographique) sv. 7 i 8, Beograd.
- Cvijić, J. 1926: Geomorfologija (Morphologie terrestre), Vol. II, Beograd.
- Cvijić, J. 1960: La Géographie des terrains calcaires. Monographies, Tome CCCXLI, No. 26, Beograd.
- Gjurašin, K. 1942: Prilog hidrografiji primorskog krša (Contribution à l'hydrographie du karst littoral). Tehnički Vjesnik (Bulletin Technique), No. 59, Zagreb.
- Gjurašin, K. 1943: Prilog hidrografiji krša (Contribution à l'hydrographie du karst). Tehnički Vjesnik (Bulletin Technique), No. 60, Zagreb.
- Gračanin, M. 1947: Pedologija II dio — Fiziografija tala (Pédologie II^e partie — Physiographie des sols), Zagreb.
- Gruvel, M. A. 1930: De quelques sources marines observées sur les côtes libano-syriennes. Extrait des Comptes rendus des Séances de l'Académie des Sciences, pp. 66-67, Séance du 7. juillet 1930, Paris.
- Herak, M. 1957: Geološka osnova nekih hidroloških pojava u dinarskom kršu — Geologische Grundlagen einiger hydrologischen Erscheinungen im Dinarischen Karst. II Kongres geologa Jugoslavije (II^e Congrès des géologues yougoslaves), Sarajevo.
- Imbeaux, E. 1930: Essai d'hydrogéologie, Paris.
- Keller, M. 1963: Die Vreljes an der Adriaküste. Neptun, Heft 6, Stuttgart.
- Kerner, F. 1914: Geologische Spezialkarte der Oesterreichisch-ungarischen Monarchie aufgenommen und herausgegeben durch k.k. Geologische Reichsanstalt, Zone 31, 32 — Col. XIV, XV, XVI, Blatt: Sebenico und Trau, Šolta, Sinj und Spalato, — Wien.

- Korner, F. 1922: Über die morphologischen und hydrographischen Verhältnisse in Mittel-Dalmatien. Glasnik Geografskog Društva (Bulletin de la Société Géographique) sv. 7 i 8, Beograd.
- Kuščer, I. 1950: Kraški izviri ob morski obali — Karst Sources at the Sea Coast. Razprave — Disertaciones I. Slovenska Akademija Znanosti in Umetnosti, Classis III, Series A. Ljubljana.
- Lehmann, O. 1932: Die Hydrographie des Karstes, Leipzig und Wien.
- Lorenz, J. 1859: Die Quellen des liburnischen Karstes und der vorliegenden Inseln. Mitteil. d. k. k. Geogr. Ges. III, Wien.
- Lorenz, J. 1863: Physikalische Verhältnisse und Verteilung der Organismen in Quarnerischen Golfe, Wien.
- Mijatović, B. 1959: Hidrogeološka uloga eocenskog fliša pri formiranju slatkovodne izdani u karstifikovanim krečnjacima Dinarske primorske zone (Rôle hydrogéologique du Flysch éocène dans la formation de la nappe d'eau douce dans les calcaires karstifiés de la zone du littoral Dinarique), III Kongres geologa Jugoslavije (III^e Congrès des géologues yougoslaves), Budva.
- Mikinčić, V. 1953: Geološka karta FNRJ i susjednih zemalja (Carte géologique de la R. P. F. de Yougoslavie et des pays voisins), Beograd.
- Milić, Č. 1959: Obalni predeo Trogira — karakteristike recentnog mikroreljefa (Caractéristiques du microrelief récent). Zbornik radova Geografskog instituta (Recueil des travaux de l'Institut Géographique), Tom LXI, knjiga 14, Beograd.
- Milojević, B. 1933: Dinarsko primorje i ostrva (Littoral et îles dinariques), Beograd.
- Morgante, S. 1940: I bromboli delle coste istriane. Note dell'Istituto Italo-Germanico di biologia marina di Rovigno d'Istria, Vol. 16, No. 16, Venezia.
- Parenzan, P. 1960: Il Mar Piccolo di Taranto, Roma.
- Perin - Luca, L. 1960: Osservazioni di temperatura e salinità nel Golfo di Trieste. Bollettino della Società Adriatica di Scienza. Vol. LI, I della nuova serie, Trieste.
- Petrik, M. 1961: Mjerenja na vruljama — Measurements on Submarine Sources. Drugi Jugoslavenski speleološki kongres (II^e Congrès des spéléologues yougoslaves), Zagreb.
- Stepanović, B. 1962: Principi opšte hidrogeologije (Principes d'hydrogéologie générale), Beograd.
- Šegvić, B. 1955: Sistem koji omogućava prirodno odslanjenje podmorskih vrela, slanih izvora i bunara uz more — System which Enables Natural Freshening of Coastal and Submerged Salt Water Springs and Weels. Hidrografski Godišnjak (Annuaire Hydrographique) 1954, Split.
- Šikić, D. 1957: Kratki stratigrafsko-tektonski pregled Kašteli-Muč (Bref sommaire stratigraphique-tectonique Kašteli-Muč), Manuscrit, Zagreb.
- Roglić, J. 1935: Eustatički i glacioeustatički pokreti — Sur les mouvements eustatiques et glacioeustatiques. Glasnik Geografskog Društva (Bulletin de la Société Géographique), Tom. 21, Beograd.
- Sverdrup, H. V. Johnson, M. W. and Fleming, R. H. 1946: The Oceans, Their Physics, Chemistry and General Biology, New-york.
- Vardaro, E. 1958: Sul rapporto solfato-cloruri nelle acque del Mar Piccolo, del Mar Grande e del Golfo di Taranto, Thalassia Ionica, Vol. I, Napoli.
- Zore, M. 1959: Pojava leda na moru u Kaštelanskom zaljevu — On the occurrence of sea ice in the Kaštela Bay. Hidrografski Godišnjak (Annuaire Hydrographique) 1958, Split.
- Zore, M. et Zupan, A.: Hidrografski podaci za Kaštelanski zaliv 1953—1954 (Hydrographical data for the Kaštela bay 1953—1954), Acta Adriatica, Vol. IX, No. 1, Split.
- Anonymous, 1956: Supplement to the Repertory of Technical Resolutions 1919—1952 — Resolutions for Charts No. 140 A — International Hydrographic Bureau, march 1956, Monaco.

VRULJE KAŠTELANSKOG ZALJEVA

— morfologija, hidrološka struktura, hidrogeološka svojstva,
geotektonski odnosi —

S. AlfIREVIĆ

KRATAK SADRŽAJ

Obalni i otočni pojas jadranskog basena obiluje podmorskim slatkovodnim izvorima — »vruljama« — koje predstavljaju značajan fenomen hidrografije krša. Njihovu masovnu pojavu uvjetuje intenzivna cirkulacija podzemnih voda u području Dinarskog primorskog krša, koje je, zahvaljujući geološkoj građi jadranske obale i otoka, moglo maksimalno razviti specifične morfološke i hidrogeološke pojave.

U sklopu istraživanja vrulja u Jadranskom moru i u vezi s tim cirkulacije podzemnih voda u prioblanom području krša, izvršena su po prvi put u Jadranu kompleksna hidrogeološka ispitivanja vrulja Kaštelanskog zaljeva kod Splita. Postignuti rezultati ovih ispitivanja predstavljaju prilog poznavanju njihove morfogeneze, hidrološke strukture, hidrogeologije i geotektonskih odnosa.

Provedenim istraživanjima na vruljama Kaštelanskog zaljeva je utvrđeno slijedeće:

Morfološki aspekt vrulja odgovara potopljenim fosilnim vrtačama prediluvijalne starosti, koje su formirane u kontinentalnoj fazi Dinarskog primorskog krša. U vezi s tim je izneseno mišljenje da se ovaj fenomen može tretirati kao prilog geomorfološkoj metodi za utvrđivanje postdiluvijalne marinske transgresije na istočnoj obali Jadrana.

Hidrološka struktura vrulja je pod direktnim uplivom oborina i u njihovoj zavisnosti intenzivnije cirkulacije podzemnih voda koje na istraženim vruljama izbijaju. Utvrđena su u toku hidrološke godine dva vremenska razdoblja u kojima se vrulje po hidrografskim svojstvima razlikuju, odnosno izjednačavaju sa morskom vodom Kaštelanskog zaljeva. To su: period zime sa kasnom jeseni i ranim proljećem i period ljeta sa kasnim proljećem i ranom jeseni. U zimskom razdoblju vrulje ispoljavaju homotermiju i niže vrijednosti saliniteta koje u izuzetnim meteorološkim prilikama uvjetuju i pojavu leda na otvorenom dijelu zaljeva. U ljetnom razdoblju ovih specifičnosti u njihovoj hidrološkoj strukturi nestaje. Značajno je, međutim, da su vrulje u ovom razdoblju u pridnenim slojevima manje slanosti od vode Kaštelanskog zaljeva što upućuje na njihovu aktivnost, iako se ista vidljivo ne manifestira na površini. Druga značajna spoznaja leži u činjenici da su kontinentalne, podzemne vode skoro u toku čitave hidrološke godine izuzev zimskih mjeseci toplije od morske vode Kaštelanskog zaljeva.

Talozi okolnog područja vrulja se po teksturno-sedimentološkim svojstvima također razlikuju od sedimentološkog pokrova Kaštelanskog zaljeva. Na obodu potopljenih vrtača se taloži krupnozrni pijesak zaobljenih bridova terigenog porijekla, transportiran podzemnim vodama, kao i terra rossa.

Po litološkom i mikropaleontološkom sastavu, potopljene vrtače pripadaju eocenskim laporovitim vapnencima, te se po geološkoj građi uklapaju u flišnu sinklinalu Kaštelanskog zaljeva.

Stijenske mase hidrološkog zaleđa Kaštelanskog zaljeva su okarakterizirane takvim hidrogeološkim svojstvima, da u međusobnim odnosima imaju funkcije kolektora i izolatora. Gornjo-kredni vapnenci i dolomiti su vodo-propusni, te zauzimaju centralni položaj u ovom zaleđu, a nalaze se između nepropusnih naslaga trijaskе formacije u pozadini i paleogenskih naslaga u obalnom pojasu Kaštelanskog zaljeva. Visoki reljef i jak hidrostatski tlak u hidrološkom zaleđu pospješuju gravitiranje podzemnih voda prema moru.

Geotektonski odnosi u geologiji istraženog područja su presudni za izbijanje podzemnih voda na vruljama Kaštelanskog zaljeva. Verfenske naslage u pozadini, kao i paleogenske naslage na obalnom pojasu Kaštelanskog zaljeva nalaze se prema gornjokrednim vapnencima i dolomitima duž reversnih rasjeda. Potopljene vrtače, evidentirane na morskom dnu, se također mogu tretirati kao indikator rasjedne linije, duž koje su i formirane u kontinentalnoj fazi ovog dijela Dinarskog primorskog krša. Ove vrtače su marinskom transgresijom potopljene, a intenzivnom cirkulacijom podzemnih voda fungiraju u recentnim uslovima kao vrulje.

CONTENU

INTRODUCTION	3
MATÉRIEL ET MÉTHODES	5
RÉSULTATS OBTENUS	8
a) Caractéristiques bathymétriques	9
b) Caractéristiques morphologiques	10
c) Structure hydrologique	15
<i>Température</i>	16
<i>Salinité</i>	19
d) Caractéristiques sédimentologiques et géologiques	25
e) Relations hydrogéologiques et géotectoniques	27
f) Origine des eaux souterraines	31
<i>Coloration à la fluorescéin</i>	31
CONCLUSIONS	32
BIBLIOGRAPHIE	35
KRATAK SADRŽAJ	37

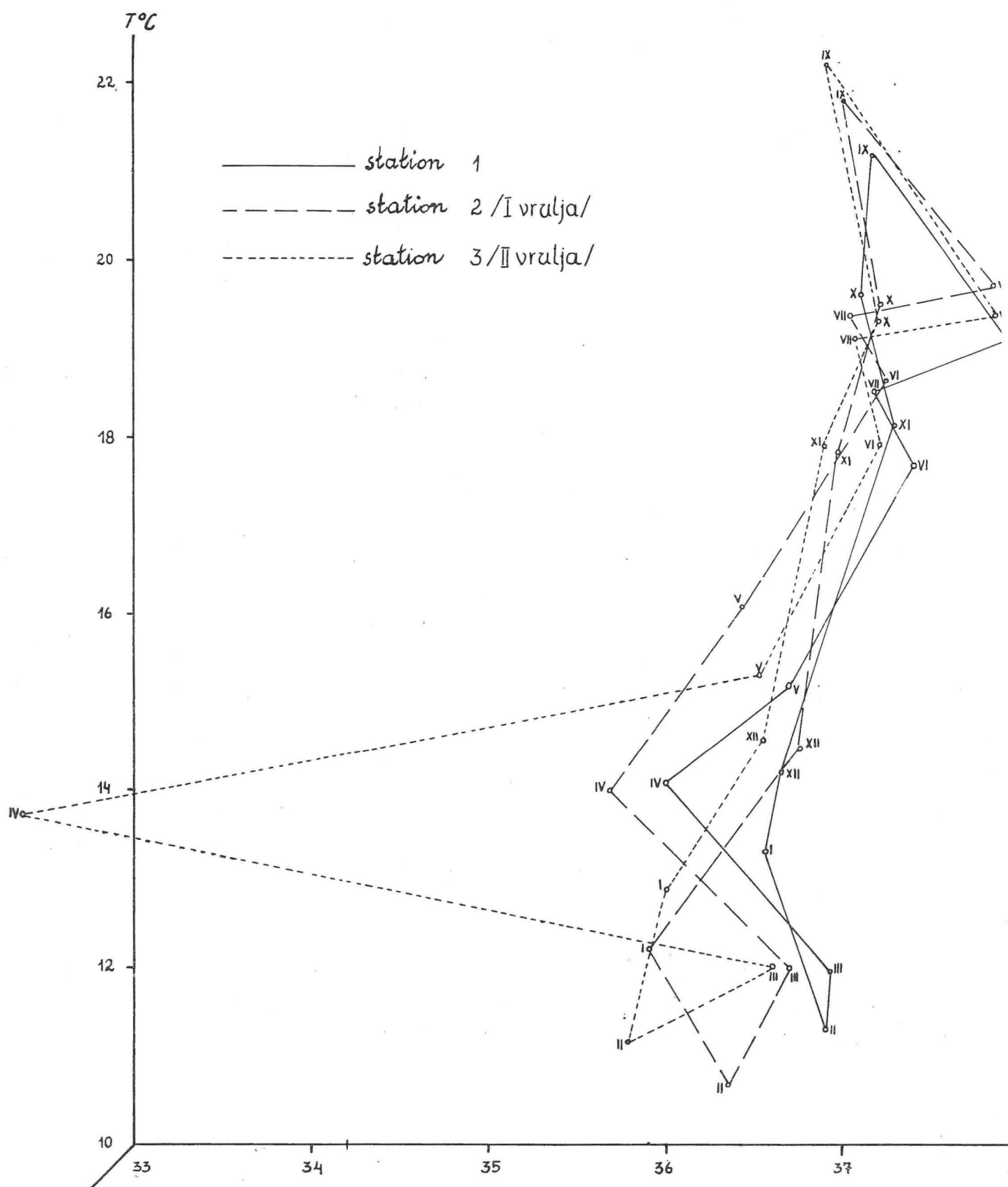


Fig. 9. Courbe T—S des valeurs moyennes de température et de salinité pour la période comprise entre IX 1963 et V. 1964 aux stations 1, 2 et 3.

FLUCTUATIONS ANNUELLES DE TEMPÉRATURE ET DE SALINITÉ

Tableau III

Sta- tion N°	Date		Température °C					Salinité ‰				
			0	5	10	20	30	0	5	10	20	30
1	15.	IX 1963.	23,4	22,9	21,9	20,6	17,4	35,39	36,96	37,75	37,83	38,10
2	15.	IX 1963.	24,4	23,1	22,2	<u>20,3</u>	<u>19,2</u>	35,35	36,64	37,36	<u>37,81</u>	<u>37,97</u>
3	15.	IX 1963.	24,1	23,1	22,0	<u>19,8</u>	*	35,66	36,51	37,58	<u>38,19</u>	*
1	22.	X 1963.	19,1	19,4	19,3	20,0	20,1	36,78	37,05	37,05	37,29	37,48
2	22.	X 1963.	19,2	19,3	19,3	<u>19,4</u>	<u>20,2</u>	36,91	37,07	37,23	37,48	37,61
3	22.	X 1963.	19,3	19,4	19,5	<u>20,1</u>	20,1	36,96	36,96	37,10	37,50	37,56
1	20.	XI 1963.	17,8	17,8	17,8	18,7	18,8	37,10	37,09	37,10	37,56	37,70
2	20.	XI 1963.	17,6	17,7	17,8	<u>18,1</u>	<u>18,1</u>	36,92	37,00	37,00	37,10	<u>37,16</u>
3	20.	XI 1963.	17,6	17,6	17,7	<u>18,3</u>	<u>18,3</u>	36,94	36,94	36,94	<u>37,14</u>	*
1	18.	XII 1963.	12,9	13,8	14,2	14,9	15,5	35,53	36,08	36,91	37,25	37,50
2	18.	XII 1963.	14,5	14,4	14,5	<u>14,6</u>	<u>14,8</u>	36,24	36,51	37,00	<u>37,01</u>	<u>37,05</u>
3	18.	XII 1963.	14,6	14,4	14,7	<u>14,6</u>	<u>14,8</u>	35,16	36,58	37,16	<u>36,67</u>	<u>37,14</u>
1	15.	I 1964.	12,3	11,9	12,1	14,7	15,5	35,86	35,90	36,02	37,18	37,83
2	15.	I 1964.	12,4	12,1	12,2	<u>12,3</u>	<u>12,4</u>	35,57	36,06	36,04	<u>36,11</u>	<u>35,68</u>
3	15.	I 1964.	12,7	12,4	12,5	<u>13,3</u>	<u>13,7</u>	34,99	35,97	36,08	<u>36,11</u>	<u>36,82</u>
1	22.	II 1964.	10,8	10,8	10,8	11,8	12,6	36,47	36,49	36,65	37,19	37,75
2	22.	II 1964.	10,8	10,8	10,6	<u>10,8</u>	<u>10,8</u>	36,06	36,06	36,53	<u>36,53</u>	<u>36,56</u>
3	22.	II 1964.	10,9	10,9	10,8	<u>11,1</u>	<u>12,6</u>	36,09	36,69	36,69	<u>35,64</u>	<u>33,95</u>
1	14.	III 1964.	11,6	11,8	11,8	12,2	12,6	36,04	36,45	36,49	37,54	38,12
2	14.	III 1964.	12,0	12,0	11,9	12,2	<u>12,2</u>	36,26	36,42	36,58	<u>37,10</u>	<u>37,16</u>
3	14.	III 1964.	12,1	11,8	12,0	<u>12,1</u>	<u>12,2</u>	35,37	36,56	36,89	<u>36,92</u>	<u>37,32</u>
1	16.	IV 1964.	14,8	14,7	14,2	13,6	13,4	33,58	33,73	35,71	37,19	37,79
2	16.	IV 1964.	14,0	14,2	14,1	13,9	<u>13,9</u>	34,58	34,78	35,08	<u>36,73</u>	<u>37,23</u>
3	16.	IV 1964.	13,0	14,0	14,2	<u>13,7</u>	<u>13,6</u>	33,95	34,20	35,68	<u>37,25</u>	<u>20,73</u>
1	18.	V 1964.	16,2	15,8	14,8	15,0	14,4	36,26	36,29	36,35	37,21	37,43
2	18.	V 1964.	17,4	16,2	15,9	<u>15,6</u>	<u>15,6</u>	35,68	36,08	36,42	<u>36,89</u>	<u>37,12</u>
3	18.	V 1964.	16,6	15,4	14,9	<u>14,9</u>	<u>14,8</u>	35,77	35,95	36,36	<u>37,27</u>	<u>37,34</u>
1	15.	VI 1964.	21,4	19,0	17,8	16,0	14,4	36,31	37,18	37,63	37,81	38,15
2	15.	VI 1964.	21,8	19,2	18,2	<u>17,1</u>	<u>17,1</u>	36,24	37,03	37,50	<u>37,65</u>	<u>37,81</u>
3	15.	VI 1964.	22,4	20,6	18,2	<u>16,5</u>	<u>16,4</u>	36,31	36,56	37,54	<u>37,83</u>	<u>37,90</u>
1	15.	VII 1964.	22,1	20,5	19,6	15,6	15,0	36,58	36,67	37,10	37,79	37,81
2	15.	VII 1964.	22,6	21,4	20,4	<u>16,3</u>	<u>16,3</u>	36,53	36,76	36,89	<u>37,61</u>	<u>37,65</u>
3	15.	VII 1964.	23,0	21,8	19,8	15,6	<u>15,6</u>	36,60	36,62	37,09	<u>37,61</u>	<u>37,66</u>
1	15.	VIII 1964.	22,0	21,7	20,4	16,0	15,6	37,19	37,47	38,04	38,44	38,58
2	15.	VIII 1964.	22,4	21,6	19,8	<u>17,5</u>	<u>17,4</u>	37,30	37,54	37,88	<u>38,42</u>	<u>38,24</u>
3	15.	VIII 1964.	22,4	21,4	20,6	<u>16,4</u>	<u>16,4</u>	37,36	37,70	37,81	<u>38,01</u>	<u>38,44</u>

— plus froide
— plus chaude

— basse salinité

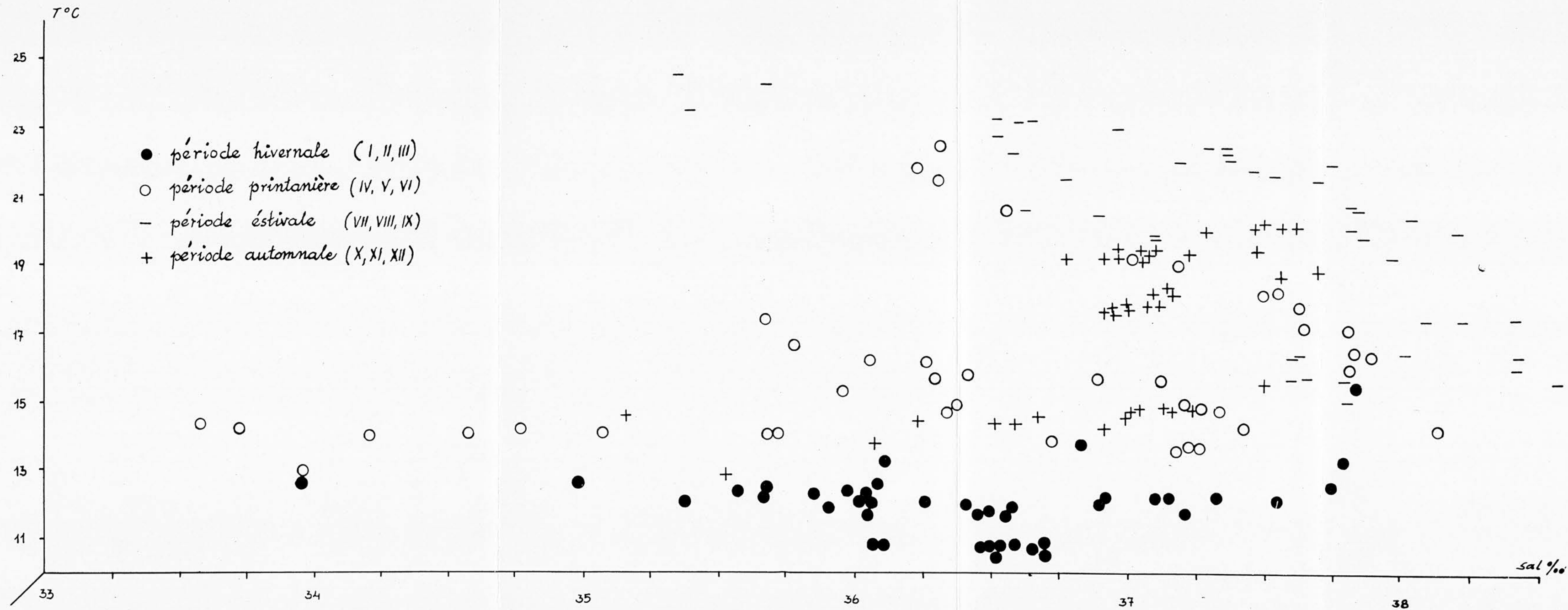


Fig. 10. Diagramme T—S pour les stations étudiées 1, 2 et 3, entre 1X 1963 et VIII 1964.

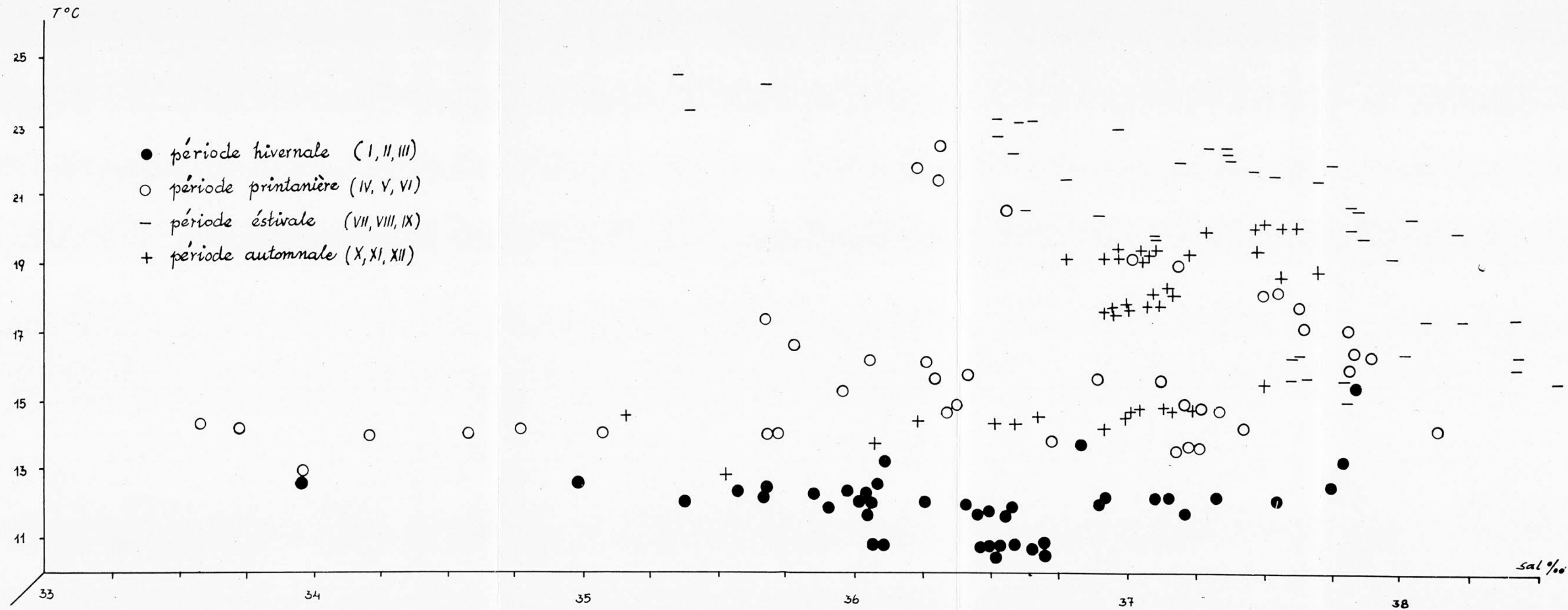


Fig. 10. Diagramme T—S pour les stations étudiées 1, 2 et 3, entre 1X 1963 et VIII 1964.