CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCÉANS

39, avenue d'Iéna - 75016 PARIS

Contrat CNEXO-BRGM n° 73/809 du 3 décembre 1973

"L'eau douce sur le littoral"

ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES SOURCES LITTORALES ET SOUS-MARINES

B.R.G.M. - S.E.M.

Etude documentaire par H. PALOC" et L. POTIÉ**

'Bureau de recherches géologiques et minières
---Société des eaux de Marseille

BUREAU DE RECHERCHES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES

74, rue de la Fédération, 75739 Paris Cédex 15 - Tél.: (1) 783.94.00

SERVICE GÉOLOGIQUE NATIONAL

Département géologie marine

Département géologie de l'aménagement

B.P. 6009 - 45018 Orléans Cédex - Tél.: (38) 66.06.60

SOCIÉTÉ DES EAUX DE MARSEILLE
25, rue Edouard- Delanglade - B.P. 462 - 13217 Marseille Cédex 1 - Tél.: (91) 53.41.35

Juillet 1974

S O M M A I RE

II

pages

RÉSUMÉ

AVANT-PROPOS 1
INTRODUCTION 3
1. INFORMATIONS DIVERSES RECUEILLIES SUR LES SOURCES LITTORALES SOUS-MARINES ET SUR LEURS ESERVOIRS) 5
1. 1. Rappel des caractères hydrogéologiques des réservoirs aquifères calcaires
1. 2 . Localisation des sources littorales et sous - marines 8
1.2.1. Situation 8
1.2.2. Morphologie 10
1.2.3. Débit 11
1.2.4. Minéralisation 13
1.3. Relations eau douce- eau salée *15*
1.3.1. Aspects généraux communs à tous les types de réservoirs aquifères *15*
1.3.2. Aspects particuliers propres aux réservoirs aquifères calcaires 20
1.3.2.1. Constatation des auteurs 20
1.3.2.2. Explications proposées 21
1.3.2.1.1. Cas des conduits karstiques considérés isolément 22
1.3.2.2.2. Cas des conduits karstiques associés aux porosités d'interstices et de fissures 24
2. TECHNIQUES D' D'ÉTUDES ET DE CAPTAGE 27
2. 1. Techniques d' études 27
2.1.1. Détection des sources sous-marines 27
2.1.1.1. Densimétrie 28
2.1.1.2. Conductimétrie 28
2.1.1.3. Radiométrie infra-rouge 30
2.1.1.4. Sismique réflexion 31
2.1.2. Détection des conduits karstiques *32*
2.1.2.1. Apports de la plongée souterraine 32
2.1.2.2. Méthodes géophysiques seules possibles 32
2.1.2.3. Méthodes géophysiques combinées avec la plongée 33
2.1.3. Autres techniques d'études 33
2.2. Techniques de captage 34
2.2.1. Essai d'inventaire des travaux existants 34
2.2.1.1. Sur des sources sous-marines 34
2.2.1.2. Sur des sources continentales 36
2.2.1.3. En d'autres points du réservoir 36
2.2.2. Solutions préconisées 39
2.2.2.1. Sans aménagements spéciaux 40
2.2.2.2. Avec aménagements spéciaux 40
2.2.2.2.1. Destinés à isoler la zone d'eau douce 41
2.2.2.2.2. Destinés à mettre en charge l'eau douce 41
3. INTÉRÊT ÉCONOMIQUE 42
3. 1. Évaluation de la ressource 42
3. 2. Evaluation du coût de l' exploitation 44
3.3. Evaluation des besoins 45
CONCLUSION 48
BIBLIOGRAPHIE DES TRAVAUX CONSULTES 50
EXAMEN DU CONTENU DES TRAVAUX CONSULTES 66
PLANCHES DE SITUATION DES TRAVAUX CONSULTES 95
I - FRANCE : littoral méditerranéen 96
II - ESPAGNE 97
III - ITALIE 98
IV - YOUGOSLAVIE 99
V - GRÈCE 100
VI - U.R.S.S. - ROUMANIE - TURQUIE 101
VII - SYRIE - LIBAN - ISRAËL 102
VIII - U.S.A. : littoral atlantique 103

EN ANNEXE Etudes et captage de résurgences d'eau douce sous-marines (L.POTIE et J.RICOUR) - Tiré à part extrait de la revue technique internationale de l'eau - Octobre *1973.*

TABLE DES FIGURES

pages

1 - Schéma des circulations karstiques en zone maritime 7
d'après ARCHAMBAULT (4)
2 -'Les formes du littoral marin et continental 7
d'après de VAUMAS (160)
3 - Exemple de diffluence d'un écoulement karstique littoral 7
d'après KUSCER (93)
4 - Cycle tyrrhénien (variations du niveau de la mer depuis le Riss) 7
d'après POTIÉ (138)
5 - Grands ensembles karstiques et principales émergences littorales et sous-marines de la côte méditerranéenne française 9
d'après DUROZOY (51)
6 - Source sous-marine d'Anavalos d'Astros : plan et coupe 12
d'après F.A.O. (57)
7 - Source sous-marine de la VISE (schéma du dispositif d'étude par dérivation partielle de l'écoulement) 12
8 - Exemples de relation d'un réservoir aquifère avec la mer 13
d'après COTECCHIA (38)
9 - Échanges eau douce-eau salée dans un réservoir aquifère 13
d'après COTECCHIA (38)
10 - Répartition des isochlores dans le "Biscayne Aquifer" 13
d'après WAIT (163)
11 - Mouvement de l'eau et températures dans le "Floridan Aquifer" 13
d'après KOHOUT (86)
12 - Relations entre sources littorales et sous-marines à Chekka 16
d'après MOULLARD (127)
13 - Schéma de la contamination d'une source par un orifice inférieur 16
d'après KUSCER (93)
14 - Schéma de la contamination d'une source par son conduit de sortie 16
d'après STEFANON (155)
15 - Schéma de la contamination d'une source par perte de pression 16
d'après COTECCHIA
16 - Influence d'une source sur l'équilibre eau douce-eau salée 16
d'après STRINGFIELD (157)
17 - Régime comparé de sources continentales et littorales 18
d'après F.A.O. (55)

18 - Relations niveau marin, chlorures et températures de la source Marina d'après JEVREMOVIC (74) 18
19 - Relations niveau marin, chlorures et températures de la source Poljice d'après JEVREMOVIC (74) 18
20 - Relations dynamiques eau douce-eau salée en réservoir aquifère littoral d'après MIJATOVIC (115) 18
21 - Variations des conditions d'écoulement dans un réseau à orifices superposés d'après MIJATOVIC (115) 23
22 - Schéma de KUSCER d'un système karstique littoral d'après MIJATOVIC (113) 23
23 - Schéma des conditions d'écoulement dans un Karst littoral d'après PAVLIN (135) 23
24 - Modèle hydraulique du système karstique de Céphalonie d'après MAURIN (110) 25
25 -Schéma d'écoulement du système karstique de Céphalonie d'après STRINGFIELD (158) 25
26 - Situation de la source Bayou et du lac Tarpon d'après STRINGFIELD (158) 25
27 - Système hydraulique du lac Tarpon d'après STRINGFIELD (158) 25
28 - Repérage en mer des émergences du Liouquet par enregistrement de résistivité d'après DUROZOY (51) 29
29 - Mesures électromagnétiques paramétriques sur le karst de Port-Miou d'après DUROZOY (51) 29
30 - Pompage en aquifère libre littoral d'après STRINGFIELD (158) 35
31 - Pompage en aquifère captif littoral d'après STRINGFIELD (158) 35
32 - Intrusion salée sous l'influence d'un pompage d'après MIJATOVIC (115) 35
33 - Proposition de pompage en zone salée pour réduire la contamination d'après MIJATOVIC (115) 35
34 - Dépressions de sécurité pour un pompage en aquifère contaminé d'après ZORZI (166) 35
35 - Captage de la ville d'Yport d'après BASSOMPIERRE (13) 37
36 - Schéma du captage de la source sous-marine de Citro-Citrello d'après STEFANON (155) 37
37 - Schéma du barrage "chicane" projeté dans la galerie de Port-Miou d'après POTIÉ (138) 37
38 - Schéma de l'aménagement réalisé dans la galerie de Port-Miou d'après POTIÉ (138) 37
39 - Coupe schématique de la galerie sous-marine de PORT-MIOU d'après POTIE (139) 37 bis
40 - Photographie du modèle réduit réalisé pour l'étude des relations eau douce-eau salée (ici colorée en bleu) dans la galerie sous marine de PORT-MIOU (d'après RICOUR - Rapport inédit du Syndicat de recherches d'eau de PORT-MIOU - 71 SGN 411 - Oécembre 1971) 37 bis

Observations : On trouvera dans le tiré à part donné en annexe ("Etudes et captage de résurgences d'eau douce sous-marines", de L.POTIE et J. RICOUR) diverses autres figures utiles à consulter.

R E S U M E

Le présent rapport rassemble les principales informations recueillies à l'occasion d'une étude documentaire sur les sources littorales et sous-marines en vue de préciser l'état de leur connaissance et de tenter de mieux évaluer les possibilités de leur exploitation.

I1 a été réalisé à la demande du Centre national pour l'exploitation des océans par le Bureau de recherches géologiques et minières avec le concours de la Société des eaux de Marseille.

Le dépouillement de 167 publications, la plupart très récentes et consacrées totalement ou pour partie à ce sujet, a permis de rendre compte de la distribution géographique de ces sources, de leurs caractéristiques morphologiques, de leur régime et de leur minéralisation, des conditions hydrogéologiques très diverses de leur réservoir, des études et travaux d'aménagement auxquels elles ont donné lieu, de leur intérêt économique et des perspectives de leur utilisation. Des recommandations sont faites en conclusion quant à des opérations complémentaires qu'il serait souhaitable de mener à bien.

L'étude documentaire a été effectuée en étroite collaboration par MM. L. POTIÉ et H. PALOC,

AVANT - PROPOS

Le présent rapport a pour objet une mise au point des connaissances bibliographiques acquises dans le domaine des sources littorales et sous-marines en vue de mieux évaluer leur intérêt et la possibilité de leur utilisation.

I1 a été réalisé à la demande du Centre national pour l'exploitation des océans (CNEXO) dans le cadre du contrat n° 73/809 passé le 3 décembre 1973 avec le Service géologique national (S.G.N.) du Bureau de recherches géologiques et minières (B.R.G.M.) et selon les dispositions prévues à l'annexe technique jointe à ce contrat.

Sa préparation a été effectuée au département "Géologie de l'aménagement" du S.G.N. avec l'appui du service "Géologie marine"*, ce service assurant en effet la coordination des recherches géologiques en zones marines et les relations du B. R. G. M. avec le CNEXO.

En outre, le B.R.G.M. s'est réservé le concours de la Société des eaux de Marseille (S.E.M.), celle-ci étant déjà associée à lui pour la conduite d'études et travaux dans le domaine des sources sous-marines (Syndicat de recherches de Port-Miou).

Deux ingénieurs ont tout spécialement contribué à la préparation de ce rapport et ont étroitement collaboré à cette fin : MM. Henri PALOC pour le B. R.G.M. et Louis POTIÉ pour la S.E.M. La recherche et la sélection des publications à examiner s'en sont ainsi trouvé facilitées tandis que leur examen critique en commun, en fonction de l'expérience de chacun, permettait des échanges de vues très profitables, améliorant le contenu du présent texte tout en facilitant sa préparation.

I1 apparaît toutefois que bien que l'essentiel des informations sur le sujet paraisse avoir été recueilli - et se trouve résumé ci-après - l'enquête documentaire comporte encore certaines lacunes : en effet, au-delà des 167 publications dépouillées, de nombreuses autres références ont été notées, relatives à des textes qu'il aurait sans doute été bon de consulter, mais qui n'ont pu être rassemblés dans les délais prévus par le contrat : en particulier certaines des démarches entreprises pour obtenir des publications étrangères n'ont pas encore abouti. Il importerait donc de pouvoir compléter progressivement par la suite la documentation à ce jour réalisée, et en tous cas de se tenir informé des plus récentes études sur le sujet.

Par ailleurs, il convient de souligner aussi bien l'inégal intérêt des textes examinés, que la rareté relative d'études poussées et de travaux significatifs effectués dans le domaine qui nous intéresse ici : il en résulte que certaines incertitudes demeurent encore, tant du point de vue théorique qu'appliqué, sur les divers problèmes qui seront ici évoqués.

*devenu département "Géologie marine" à compter du ter juin 1974.

A cet égard, il n'est pas douteux qu'un effort important de recherches devrait être fait qui viendrait compléter celles déjà effectuées ou en cours dans le réservoir aquifère littoral du réseau karstique de Port-Miou à l'occasion des travaux d'aménagement conduits par le B. R. G. M. et la S.E.M. dans la partie aval, immergée, du réseau.

Un tel effort, s'appuyant sur des études et expérimentations rigoureuses en différents autres sites, serait en effet nécessaire pour que puissent bien mieux être appréciées les possibilités et modalités d'utilisation - qui apparaissent très diverses à l'issue de cette enquête documentaire - des importantes ressources en eau actuellement écoulées sans profit, un peu partout dans le Monde, par ces sources remarquables.

INTRODUCTION

Les différents points prévus par le programme d'enquête sur les sources littorales et sous-marines, et figurant en annexe technique au contrat déjà cité, étaient les suivants.:

1. Rassemblement et analyse critique des informations et publications dans le domaine des sources d'eau douce littorales et sous- marines en portant une attention particulière aux sources situées sur le pourtour du bassin Méditerranéen.

2. Analyse de la méthodologie de localisation d'étude et de captage de ces sources à la lumière des plus récents résultats obtenus.

3. Etude des relations existant entre l'eau douce et l'eau salée.

4. Examen de l'intérêt économique des sources d'eau douce littorales et sous- marines, en fonction de leurs divers caractères hydrogéologiques ; examen des possibilités de captage.

5. Analyse globale des besoins à terme d'eau douce sur le littoral français en fonction de leurs caractères et applications pratiques des possibilités éventuelles de captage.

6. Recommandations - propositions d'études complémentaires - bibliographie exhaustive.

Si tous ces points se trouvent examinés dans le présent rapport, la présentation des résultats de l'enquête diffèrera quelque peu du plan ici suggéré car il convenait d'introduire des subdivisions nécessaires à la compréhension et à la cohérence du texte pour mieux rendre compte des nombreuses observations effectuées jusqu'à ce jour.

C'est ainsi que seront examinées successivement les informations diverses recueillies sur les sources sous-marines elles-mêmes (situation, débit, minéralisation) sur le mécanisme de leur contamination et de celle de leur réservoir aquifère, par l'eau de mer ; sur les méthodes utilisées en vue de leur étude et de la recherche de points de captage ainsi que sur les constatations faites à la suite de leur exécution, selon le type de captage.

Nous examinerons ensuite - en fonction des besoins à terme d'eau douce sur le littoral méditerranéen français choisi comme exemple - quel peut être l'intérêt économique des sources littorales et sous-marines et de leurs réservoirs aquifères. Nous donnerons enfin en conclusion, à la lumière des résultats de l'enquête, notre point de vue sur la nature des moyens à mettre en oeuvre pour améliorer nos techniques d'études et d'intervention dans un domaine où demeurent encore trop d'inconnues.

Le contenu des différents chapitres est fonction du volume et de la qualité de l'information : l'on s'est en effet efforcé de ne pas donner de développement inutile à tout ce qui pouvait être présenté de façon concise, tout en ayant recours à l'illustration du. texte par des schémas sélectionnés empruntés aux divers auteurs.

Nous avons en outre laissé de côté tout ce qui ne concernait pas directement l'objet de notre enquête sauf lorsque cela nous paraissait nécessaire : en particulier de nombreuses publications relatives à des contaminations chimiques d'origines diverses non marines n'ont pas été, sauf exception, examinées s de même qu'un grand nombre d'autres consacrées à des aquifères ne donnant pas lieu à des écoulements souterrains concentrés (cas général des aquifères à seule porosité d'interstices sans exutoires privilégiés).

Pour tous compléments relatifs aux sujets abordés dans le texte, les tableaux figurant en annexe à la liste bibliographique - et permettant d'évaluer le contenu de chacune des publications consultées - pourront être utilement consultés (les numéros entre parenthèses, donnés dans le texte, correspondent aux références de la liste et des tableaux bibliographiques).

1. INFORMATIONS DIVERSES RECUEILLIES SUR LES SOURCES LITTORALES ET SOUS-MARINS ET SUR LEURS RESERV OIRS

I1 convient de préciser quelles catégories de sources vont être examinées dans cette étude

- il s'agit d'une part de sources sous- marines, c'est-à-dire de "toute arrivée d'eau souterraine dans le milieu marin (mer ou étang côtier en relation avec la mer) par un point privilégié d'un réservoir aquifère où se trouvent concentrés totalité ou partie des écoulements provenant de ce réservoir" ;

- il s'agit d'autre part de sources continentales, soit voisines d'un rivage marin (sources littorales), soit plus ou moins éloignées du rivage, mais qui ont en commun d'avoir une partie de leur réservoir aquifère directement ou indirectement en contact avec le milieu marin.

Du point de vue chimique, les unes comme les autres de ces sources peuvent être douces ou sujettes, le plus souvent, à des contaminations plus ou moins fortes et plus ou moins périodiques par.l'eau salée provenant du milieu marin.

De l'examen bibliographique auquel nous avons procédé, il ressort que la quasi-totalité des sources citées par les auteurs, et entrant dans les catégories ci-dessus définies, sont issues de formations calcaires presque toujours très "karstifiées". C'est donc essentiellement à ce type de réservoir que nous allons avoir à faire ici et il importe de préciser quelles sont ses particularités hydrogéologiques.

Remarque

Indiquons toutefois qu'en ce qui concerne les sources d'origine "non karstique", le caractère de "venue d'eau concentrée" qui permet à la source d'écouler un débit notable, réduit la possibilité de leur existence aux seuls types de réservoirs qui peuvent présenter de tels points de sortie privilégiés(**).

Il peut en être ainsi, mais très exceptionnellement, pour des formations alluviales de très forte perméabilité : par exemple en Crau où des sources, appelées "laurons" écoulent des débits élevés ; de telles sources pourraient donc exister au débouché en mer de vallées alluviales, mais nous n'avons pas trouvé en bibliographie d'indication précise de leur existence - sauf peut é être dans la région du delta du Var (45) - car elles paraissent presque toujours se situer en amont du rivage, associées souvent à une zone marécageuse (cas de la Crau).

De même, et surtout, des formations consolidées - en dehors des roches calcaires - peuvent donner lieu, à la faveur de vides privilégiés et très inégalement répartis dans leur masse, à des écoulements importants : tel est le cas en particulier des formations éruptives qui, lorsqu'elles sont en situation littorales, peuvent donner lieu à l'existence de sources littorales et sous-marines : on en connaît t en différents points du Monde, et notamment dans la région de Z'étang de St. Paul, dans l'ile de la Réunion (information orale de M. X. POUL), et au large de BOUILLANTE en Guadeloupe (selon M. L.POTIE).

---

*dénommées : "Polle" en Italie, "Vrulje" en Yougoslavie.

** il est bien évident que les sources se rencontrent dans tous les types de réservoirs aquifères, mais ne sont ici examinées que les sources à fort débit relatif, c'est- à- dire, essentiellement, celles issues des réservoirs calcaires.

Dans ce dernier cas, les problèmes soulevés pour leur étude et pour leur captage s'apparentent étroitement à ceux qui se posent dans les réservoirs aquifères calcaires.

1.1. Rappel des caractères hydrogéologiques des réservoirs aquifères calcaires

Un réservoir aquifère calcaire - c'est- à- dire le type de réservoir qui alimente, ainsi que cela découle de la bibliographie consultée, la quasi totalité des sources littorales et sous- marines recensées - présente les caractères suivants

- il est très généralement karstifié c'est- à- dire qu'il possède en son sein un réseau de drainage organisé, en général très évolué, résultant de processus d'altération par érosion et dissolution que la fissuration de la roche calcaire et les eaux qu'elle a reçu, ont rendu possible ;

- ce processus de karstification a pu s'exercer dès l'émersion des massifs rocheux et se reproduire, dans des conditions variables d'intensité et de durée, à diverses époques, et dans des conditions géographiques et structurales différentes de celles d'aujourd'hui : le ou les réseaux ainsi élaborés peuvent donc se rencontrer indifféremment au- dessus ou au- dessous du niveau marin actuel (cf. figures 1 et 2) (*) ;

- à cette porosité de "chenaux", acquise par karstification, est pratiquement toujours associée une porosité de fissures qui peut être très importante dans le cas de calcaires fortement tectonisés (cas général des chaînes montagneuses situées sur le pourtour de la Méditerranée) ; enfin peut également être associée aux deux types précédents de porosité, une porosité d'interstices qui est souvent de beaucoup la plus importante (cas de certaines dolomies, des travertins, de la craie ...).

Ces divers caractères spécifiques des terrains calcaires, **parfaite**ment bien démontrés à l'occasion de très nombreuses observations, **sont tout** à fait fondamentaux et doivent être présents à l'esprit à l'occasion **de toute** étude en région littorale.

Du point de vue hydraulique, le régime de l'eau dans un réservoir calcaire karstifié sera donc fonction de la perméabilité équivalente aux différents types de porosité qui peuvent s'y rencontrer - et de leur importance relative - et résultera de leurs charges hydrauliques respectives.

Les mécanismes de stockage et de déstockage dans un tel **réservoir** nécessiteront ainsi des durées variables pour chaque type de porosité, les vitesses de transfert de l'eau y étant très différentes, pouvant atteindre plusieurs mètres par seconde dans les chenaux et moins d'un millimètre par seconde dans les interstices.

---

*_NB : l'existence de ces karsts "enfouis" sous le niveau marin est notamment attestée par les observations faites à l'occasion de plongées profondes (17) et par les données révélées par de nombreux forages aussi bien sur les continents qu'au large des rivages (82) : des cavités naturelles importantes ont ainsi été rencontrées jusqu'à plus de 1000 mètres en- dessous du niveau marin (72) ; la galerie sous-marine de PORT-MIOU, explorée sur plus de 1 km de longueur jusqu'à une profondeur de -45, en apporte également une preuve (139).

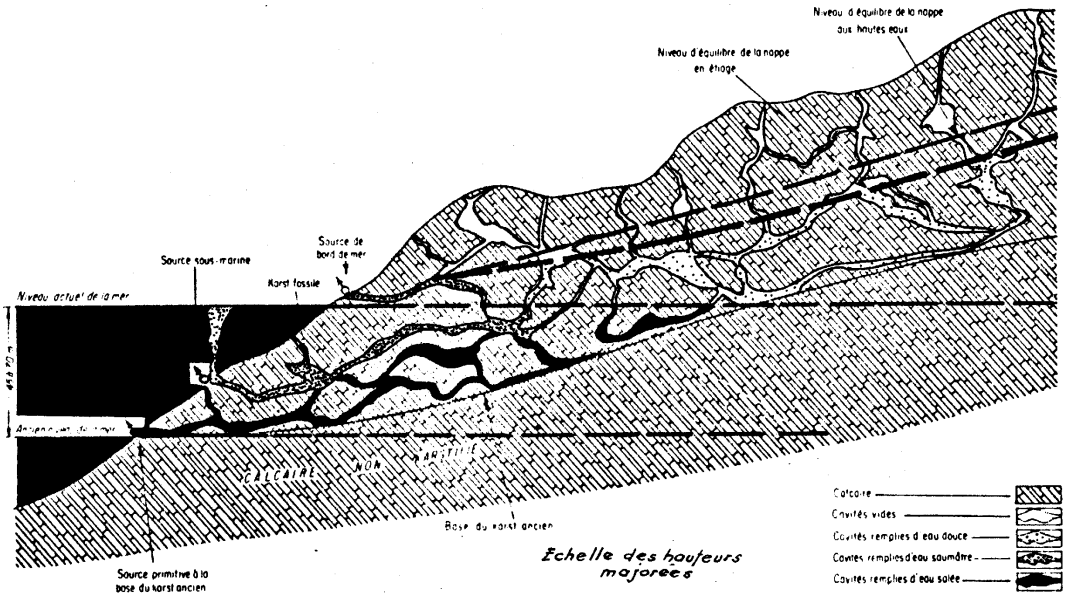


fig.1- Schéma des circulations karstiques en zone maritime. d'après ARCHAMBAULT (4)

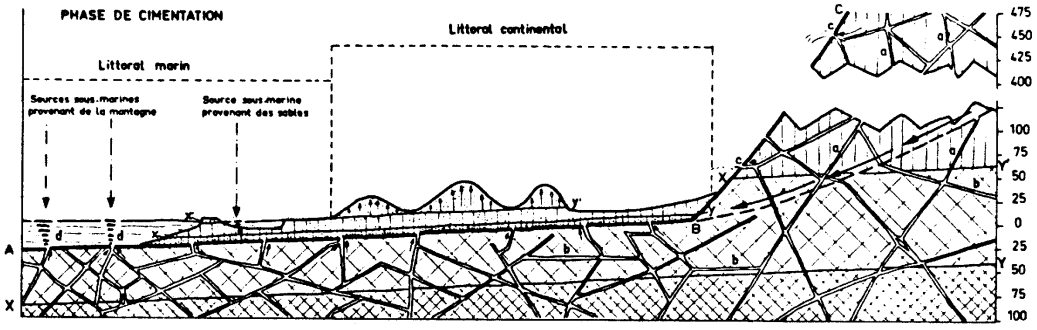
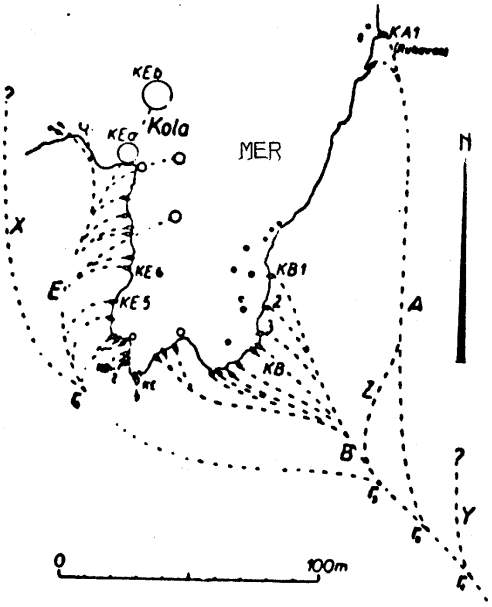


fig.2- Les formes du littoral marin et continental. d'après de VAUMAS (160)



,3- Exemple de diffluence d'un écoulement karstique littoral. d'après KUSCER (93)

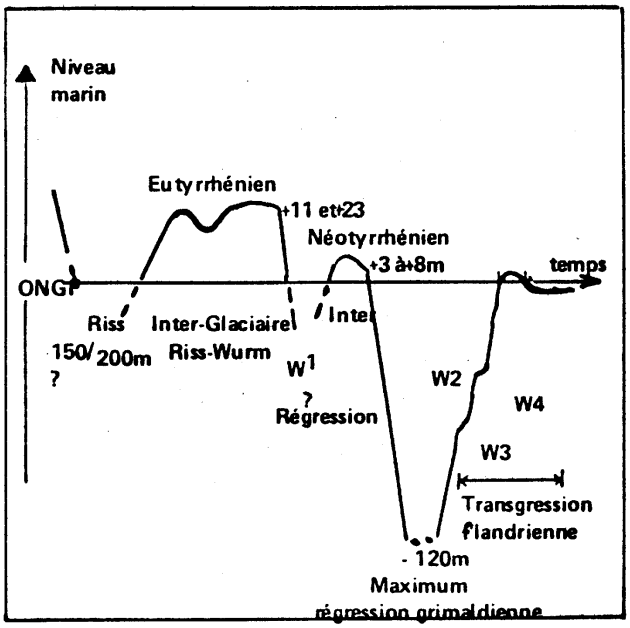


fig.4- Cycle tyrrhénien (variations du niveau de la mer depuis le RISS). d'après POTIE (138)

En particulier on notera que si d'importantes élévations de charge peuvent être observées au niveau des conduits karstiques pendant les périodes pluvieuses, cette charge diminue très vite par la suite (elle peut même s'annuler complètement dans le cas de sources temporaires) et l'on constate en période d'étiage - c'est-à-dire pendant plusieurs mois en région méditerranéenne - la faible valeur générale des gradients hydrauliques en général comprise entre 0,3 et 0,5 °/00 mais parfois inférieure à 0,1 °/oo ainsi en aquifère littoral la charge d'eau douce à 1 km de la mer peut ne pas dépasser 10 cm : nous verrons qu'elle peut en être la conséquence du point de vue de la contamination de cet aquifère par l'eau de mer.

1. 2 . La Localisation des *sources littorales et sous-marines* (*)

1.2.1. Situation

Des sources sous- marines ont été signalées en de nombreuses régions du Monde, certaines depuis très longtemps, qui ont fait l'objet d'écrits avant même et au début de l'ère chrétienne : STRABON, puis PAUSANIAS, géographes grecs, PLINE, naturaliste romain , rapportent ainsi l'existence de telles sources en divers points de la Méditerranée (82). Elles se présentent partout où se rencontrent des roches calcaires en relation avec la mer, certaines près du rivage, d'autres plus éloignées : ainsi en Floride, une source sous-marine est signalée à 4,5 km au large de Crescent Beach jaillissant à la cote -38 dans l'océan Atlantique, une autre à 18 km au lar ge de Naples dans le golfe de Mexico (81). Près de la frontière franco-italienne les sources de la Mortola jaillissent à 700 m du rivage à la cote -39 (25). En Grèce, la source d'Anavalos D'Astros jaillit à 400 m du rivage à la cote -36 (24). Au Liban les sources de Chekka se situent entre 20 et 2 000 m du rivage entre les cotes -15 et -45 (127). On a également observé des décharges d'eau souterraine en mer à 120 km de la côte de Floride (165). Les plus grandes profondeurs signalées sont de 250 m pour une source d'un très gros débit d'eau douce dans la baie de Bueno en Jamaique (157) ; en Yougoslavie, la source sous- marine de Jelesnica émergerait à la cote -130 sous la mer Adriatique (42) ; en Italie la source de Santo Cataldo émergerait à -60 à 100 m du port de Taranto (141).

En France, les sources sous- marines sont connues essentiellement en Méditerranée (cf. figure 5) : au large de Cannes (deux sources situées face à l'hôtel Carlton) (130), au large du delta du Var (deux sources respectivement situées à -24 et à -48) (45), dans la baie de la Ciotat (32), dans les calanques de la région de Cassis (37), dans le golfe de Fos (51), dans l'étang de Thau (64), dans l'étang de Leucate (30) ; il en existe également dans l'estuaire de la Gironde (29), dans

(*) N.B. On trouvera en fin de rapport les planches de situation des principales études effectuées en réservoirs aquifères karstiques littoraux dans les régions circum- méditerranéennes (et dans la partie sud- est des U.S.A.);celles, moins nombreuses, consacrées à d'autres régions, n'ont pas été situées. On notera en outre que c'est sur la côte adriatique de la Yougoslavie que les mesures sous- marines paraissent être les plus nombreuses: MIJATOVIC a ainsi relevé l'existence de 32 sources importantes entre RIJEKA et KOTOR (11

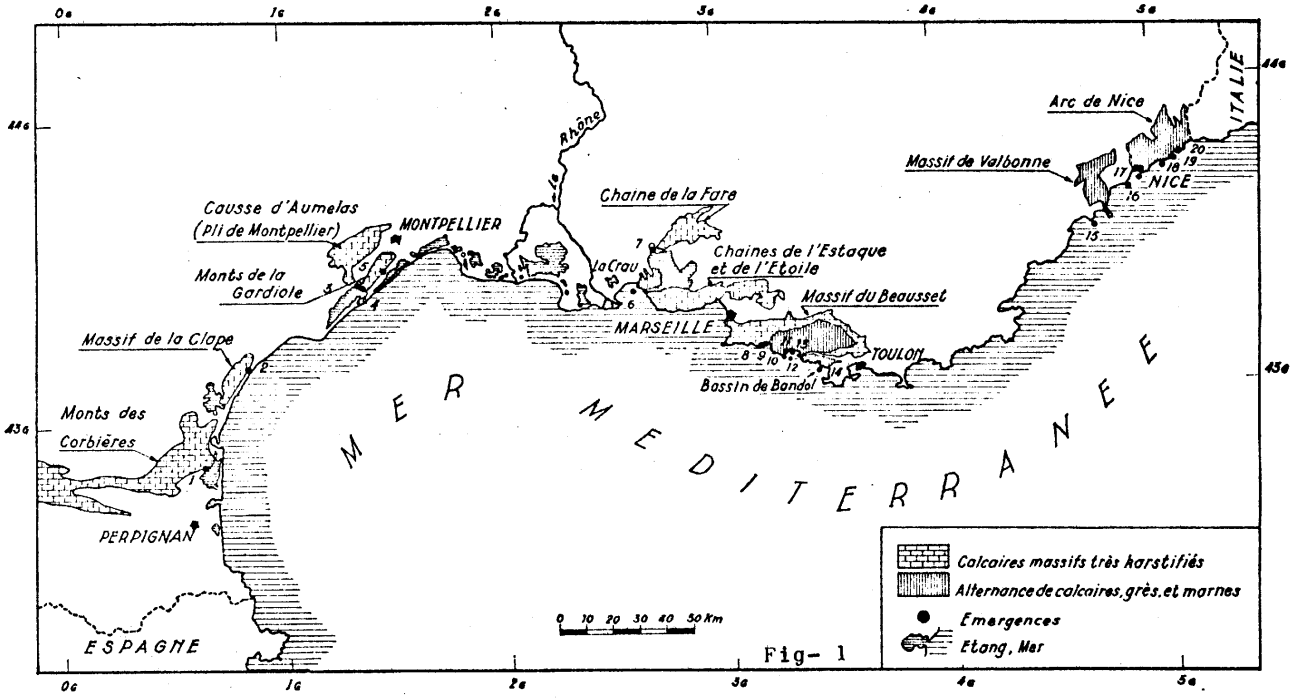


fig.5 — Grands ensembles karstiques et principales émergences littorales et sous-marines de la côte méditérranéenne française

1. Émergences de FONT ESTRAMAR et de FONT DAME
2. Émergences de PÉRIMOND et des EXALS
3. Émergence de l'ABYSSE
4. Émergences de CAUVY et d'INVERSAC
5. Émergence de la ROUBINE de VIC
6. Émergences de FOS
7. Émergences du LAURON
8. Émergences de PORT-MIOU
9. Émergences de CASSIS
10. Émergences du BEC de l'AIGLE
11. Émergences de la CIOTAT
12. Émergences de l'ILE VERTE
13. Émergences du LIOUQUET
14. Émergence de SANARY
15. Émergences de SAINTE-MARGUERITE
16. Émergences du DELTA du VAR
17. Émergences du CHÂTEAU de NICE
18. Émergence des PISSARELLES
19. Émergences du LARVOTTO
20. Émergences des MASSOLINS

d'après DUROZOY (51)

la région d'Yport (côte de la Manche) (13), et sans doute aussi, mais moins bien connues, dans les diverses régions calcaires qui se rencontrent en bordure de l'Atlantique et de la Manche.

En ce qui concerne les sources littorales et continentales, dont la minéralisation indique qu'elles se trouvent plus ou moins contaminées par l'eau de mer, des auteurs observent qu'elles peuvent être situées assez loin du rivage : il en est ainsi de la source d'Almyros qui jaillit à 1 200 m du rivage à la cote +3,5 (58) ; en Yougoslavie de telles sources sont signalées jaillissant à des cotes pouvant atteindre +15 (113) et jusqu'à +27 (74). L'altitude de ces sources est toutefois le plus souvent comprise entre 0 et +4 (56).

I1 apparaît finalement que les sources sous- marines et littorales actuellement recensées sont très nombreuses, étagées à différents niveaux, au- dessus et au- dessous de la mer, du réservoir calcaire qui les alimente ; certains réservoirs ont exclusivement des exutoires sous- marins, comme. c'est le cas sur la côte orientale de la mer Noire (77), d'autres des exutoires sous- marins et des exutoires continentaux, comme c'est le cas au Liban (127), d'autres enfin "ne paraissant avoir" que des exutoires continentaux, comme c'est le cas en Crête (58).

Les figures 1 et 2 constituent de bons exemples schématiques des relations pouvant exister, sur un plan vertical, entre les différents exutoires d'un karst ; celui de la figure 3 fait quant à lui apparaitre, sur un plan horizontal, les relations pouvant exister entre ces exutoires et illustre bien les possibilités de diffluences souvent constatées en système karstique.

En ce qui concerne la possibilité d'existence d'exutoires étagés ou dispersés dans un karst, nous devons rappeler qu'elle est la conséquence des mouvements respectifs de la mer et des continents et de leurs situations diverses au cours des périodes géologiques. A cet égard on doit savoir que la mer Méditerranée est restée pratiquement asséchée de la fin du Miocène au début du Pliocène, le fond du bassin où venaient aboutir les fleuves se trouvant à environ 3 000 m plus bas que le niveau actuel de la mer (59), de même que d'importantes fluctuations de son niveau se sont produites durant tout le Quaternaire : la figure 4 constitue une bonne illustration de ces fluctuations depuis la glaciation Rissienne.

1.2.2. Morphologie

Les caractères morphologiques habituels des sources karstiques continentales se retrouvent pour les sources sous- marines. Les exutoires se rattachent ainsi à deux types essentiels

- ceux à conduit d'arrivée des eaux vertical à sub-vertical ;

- ceux à conduit d'arrivée des eaux horizontal à sub-horizontal.

Le premier type est illustré par la source d'Anavalos (cf. figure 6), le deuxième type par la source de Port- Miou (cf. figure 39). Il existe évidemment des types mixtes et l'on peut également distinguer des exutoires à conduits très ouverts, parfois pénétrables à l'homme et d'autres à conduits plus ressérés.

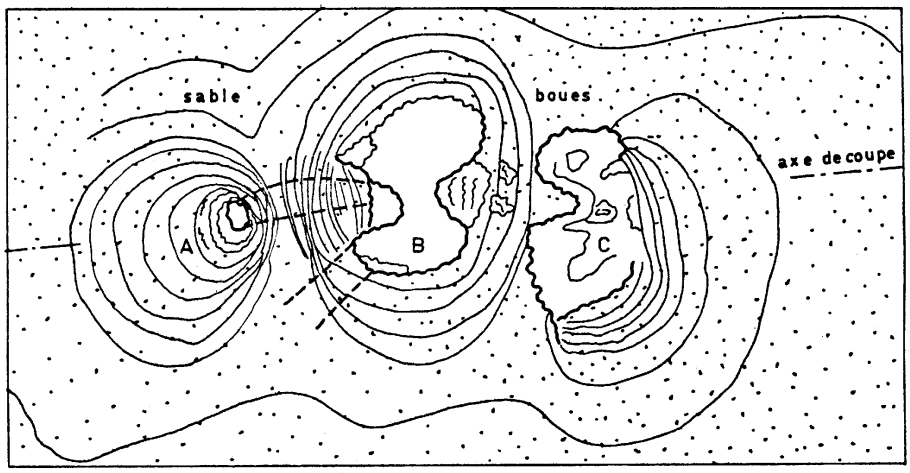
Les orifices peuvent se trouver en roche vive qui peut être elle-même constituée par le calcaire du réservoir, ou par une formation de nature lithologique différente qui lui est superposée : dans ce dernier cas c'est presque toujours à la faveur d'une faille que s'effectue la remontée de l'eau provenant du Karst sous-jacent (cas des sources de Chekka, alignées sur une cassure et s'élevant à travers un écran marneux (cf. figure 12) et cas d'un grand nombre de sources de la région du Gargano en Italie (39)).

Ils peuvent être ou non encombrés d'éboulis, ou plus ou moins masqués par des formations meubles, sables ou vases, pouvant atteindre une certaine épaisseur : l'exutoire est alors situé au fond d'un vaste entonnoir au fond duquel affleure en général la roche en place (cas de la source de la Vise dans l'étang de Thau (10)(cf. figure 7).

1.2.3. Débit

Les débits cités sont extrêmement variables et l'on doit souligner les grandes difficultés d'évaluer, et à plus forte raison de mesurer, avec exactitude, les volumes écoulés par les sources sous- marines (ainsi du reste que par certaines sources littorales et même continentales). Le régime des sources est bien entendu influencé par les divers facteurs habituels du régime en zone continentale (telle la hauteur de pluie infiltrée dans un bassin versant), mais la situation se complique, dans le cas des sources qui sont examinées ici, par des possibilités variables d'intrusion d'eau salée dans les aquifères et par les diverses fluctuations du niveau de la mer, celles dues aux marées en particulier.

Non seulement on constate ici des restitutions d'eau à des débits très divers selon le nombre et la situation des exutoires, les caractéristiques hydrogéologiques des réservoirs, l'alimentation en eau qu'ils reçoivent, mais encore on observe que des "écoulements inverses" peuvent s'y produire - c'est-à-dire que l'eau de mer pénètre elle- même dans les réservoirs -ce type d'écoulement pouvant lui- même être permanent (cas des dix pertes marines littorales et sous- marines d'Argostolion en Céphalonie (109-110), ou temporaire (cas de la source S12 de Chekka au Liban (127) située à -45, des deux sources de la baie de Kastela en Yougoslavie (3), situées respectivement à -32 et -35). De même peuvent se rencontrer simultanément dans un conduit karstique, selon sa section - le plus souvent surdimensionnée par rapport au débit qu'il écoule - et selon la charge d'eau douce, un écoulement d'eau douce à la partis supérieure du conduit allant du continent vers la mer, et un écoulement d'eau salée à la partie inférieure du conduit allant de la mer vers le continent tel est le cas donné en figure 14 s c'est un phénomène analogue à celui qui se produit en certains cas dans des estuaires ou dans des canaux dont le fond est plus bas que le niveau de la mer (cas des canaux de drainage de la région de Miami en Floride (79) ainsi que du canal reliant la source d'Inversac à l'étang de Thau.



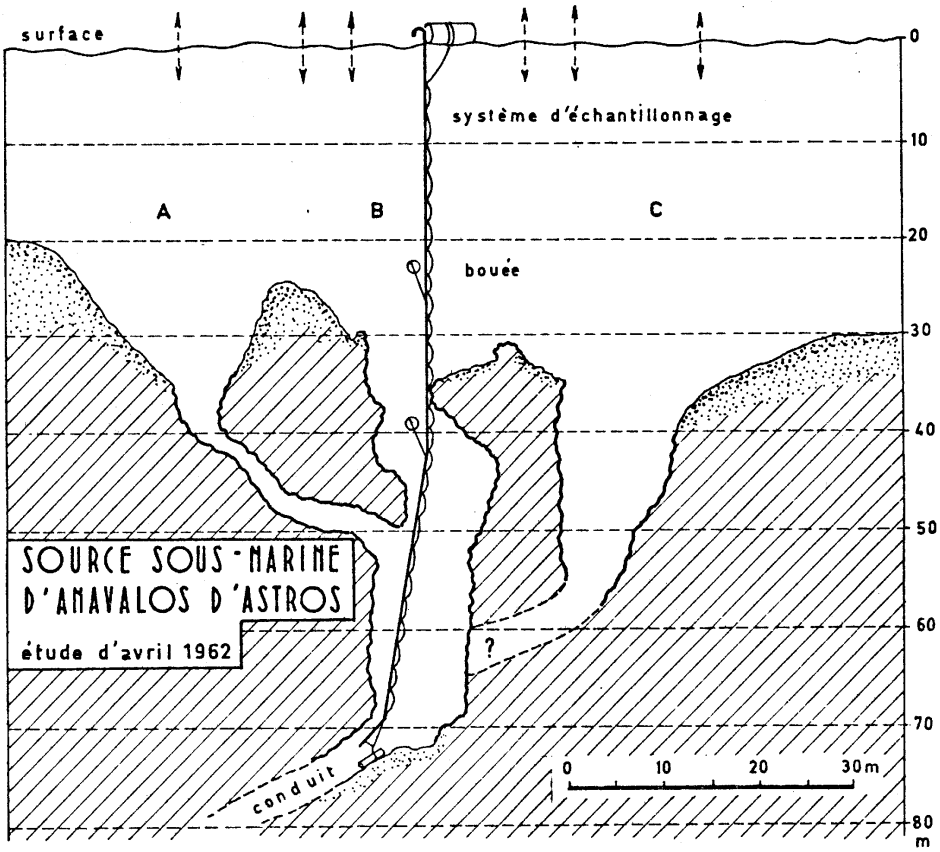


fig.6- d'après F.A.O. (57)

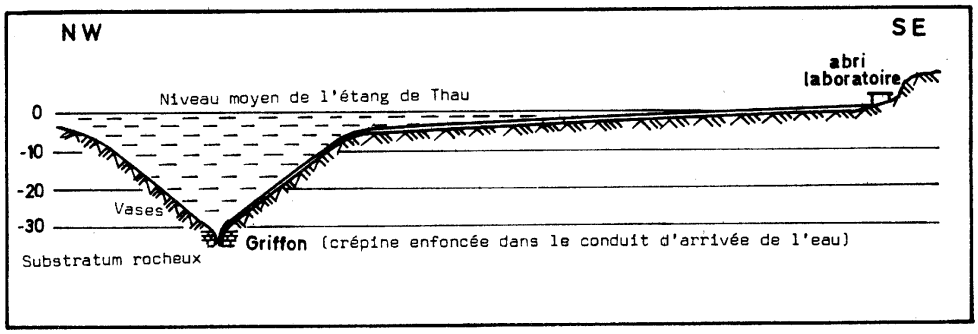


fig.7- Source sous-marine de la VISE (schéma du dispositif d'étude par dérivation partielle de l'écoulement).

Parmi les valeurs de débit citées pour les sources sousmarines, le record parait appartenir à une source de Sardaigne issue d'une grotte marine appelée Bue Marino avec 300 m3/s (126), estimation qui nous parait excessive mais que nous n'avons pas pu contrôler ; le débit de la source de Crescent Beach a été évalué à 42 m3/s à la suite de jaugeages par emploi de colorant (82) ; celui de la source S12 de Chekka atteindrait 50 m3/s : en étiage ce débit de sortie devient nul et c'est la mer qui pénètre dans l'exutoire (76) ; le débit moyen de la source d'Anavalos D'Astros serait compris entre 10 et 23 m3/s selon

,différentes estimations (57) ; en France le débit moyen des sources d'Yport serait environ de 1,5 m3/s (13), celui de la source de la Vise de l'ordre de 0,5 m3/s *.Quant aux pertes pérennes de la région d'Argostolion, elles absorbent des débits d'eau de mer compris entre quelques litres et plusieurs centaines de litres par seconde, selon les points d'absorbtion (109).

Lorsque l'on a affaire à plusieurs exutoires superposés issus du même réseau karstique on constate, lorsque le niveau de la mer s'élève, une diminution du débit des sources les plus basses et une augmentation du débit des sources les plus hautes - et inversement - : c'est notamment le cas à Yport (13).

De telles variations sont spécialement perceptibles sur certaines sources littorales et continentales, qui, lorsqu'elles se produisent, confirment bien l'existence d'écoulements plus profonds directement en relation avec la mer : en domaine sous- marin et littoral, contrairement à ce qui se passe à terre, ce sont les sources les plus basses qui s'arrêtent les premières de couler ; au-delà d'une certaine profondeur les pressions de l'eau de mer sont telles - compte tenu de sa densité et des pressions habituelles d'eau douce - qu'il ne peut plus y avoir émergence d'eau douce dans le milieu marin.

.2.4. Minéralisation

Les minéralisations observées sont, elles aussi, très variables mais toujours importantes, au moins périodiquement, pour les sources sous- marines de même que pour un grand nombre de sources littorales et continentales en raison de la pénétration de l'eau de mer dans les réservoirs aquifères. Les sources écoulant de l'eau douce de façon permanente paraissent constituer des exceptions.

En Italie, dans la pointe de Gargano, 200 sources littorales et sous- marines de débits compris entre quelques litres et 650 1/s, sont toutes saumâtres avec des teneurs de 1 à 6,5 g/1 de ClNa ; l'une de ces sources, pourtant située à la cote +6 à 2 km de l'étang de Lesina, a une salinité de 2 g/1 (39). Celles, sous- marines situées aux environs de Taranto ont des salinités différentes : 2,5 g/1 à 12 g/1 selon les exutoires (154).

En Yougoslavie, on a relevé que la teneur en eau de mer de certaines sources sous- marines constituait en étiage 75 % de leur débit (93).

* Selon L. POTIÉ, le débit de la source sous- marine de PORT-MIOU varierait entre 2 m3/s à l'étiage et plus de 100 m3/s en grande crue.

En Grèce, BURDON estime que les eaux issues des sources sous- marines contiennent de 10 à 35 % d'eau de mer, celle d'Anavalos d'Astros en contenant 90 % (57) *. Au Liban, les sources de Chekka dont le débit total varie entre 6 et 60 m3/s, voient leur minéralisation en C1¯- passer de 46 mg/1 en hiver, à 16 g/1 en été, tandis que leur trop plein continental, à plusieurs centaines de mètres du rivage, a une teneur constante de 21 mg/1 (127). En Italie, les sources littorales de Chidro, dont le débit varie entre 1 900 et 3 100 1/s, ont une salinité moyenne assez constante de 3,5 g/l, des petites variations pouvant être observées d'une source à l'autre (141). En Crête, la source d'Almyros, dont le débit varie entre 4 et 50 m3/s, voit son eau devenir saumâtre malgré son éloignement de la mer dès que son débit s'abaisse en- dessous de 13 m3/s, la teneur en Cl ¯ atteignant jusqu'à 5 g/1 : on a calculé qu'elle évacuait 600 000 t de Cl Na par an (58).

Des variations de salinité peuvent résulter des oscillations du niveau marin ; c'est un cas très fréquent illustré par l'exemple de la source Marina donné en figure 18 (par contre une telle influence n'est pas sensible dans le cas de la source Poljice, cf. figure 19). JEVREMOVIC distingue ainsi des sources dont la salinité varie beaucoup et dont la charge permanente d'eau douce n'est pas très élevée, de celles, au contraire, qui varient peu et dont la charge d'eau douce est plus forte relativement à celle de l'eau de mer (74). En France également ont été observées de semblables évolutions de minéralisations : ainsi la minéralisation en C1 Na de la source littorale d'Inversac passe de 2 à 4 g/1 lorsque le niveau de l'étang s'élève de 1,5 m ; elle atteignait autrefois jusqu'à 10 g/1 lorsque l'étang était en communication directe avec l'exutoire, conditions qui ont été modifiées par l'élévation du sol entre la source et l'étang (49). A PORT-MIOU les salinités mesurées dans la galerie à 500 mètres de sa sortie en mer varieraient entre un peu moins de 1 g/1 en période de crue et plusieurs g/1 en étiage, la minéralisation variant alors avec la profondeur : 6 g/1 à la cote -9 pour 20 g/1 à la cote -20 (139).

On notera enfin que même en période de crue subsiste souvent une minéralisation notable des sources sous- marines traduisant ainsi une certaine pérennité dans le mécanisme de l'intrusion de l'eau salée dans les réservoirs (56).

1.3. Relations eau douce- eau 6aîée 4x)

1.3.1. Aspects-généraux-communs-à-tous-les-types-âe-réservoirs-aguifères

Toute action envisagée de prélèvement d'eau en aquifère littoral, qu'il soit calcaire ou non calcaire, nécessite une connaissance préalable

---

* N.B : On sait que l'on peut tolérer pour une eau de consommation jusqu'à 450 mg/1 de C1-, ce qui correspondrait environ à 2 % d'eau de mer dans l'eau consommée. Aux U.S.A. on admet (72) l'échelle suivante de salinité de l'eau (= minéralisation totale)

eau douce	:		salinité	<	1 g/1
eau faiblement salée	:	1 g/1 <	salinité	<	3 g/1
moyennement salée	:	3 g/1 <		<	10 g/1
très salée	:	10 g/1 <		<	35 g/1
saumure	:		salinité	>	35 g/1

** Ce chapitre a été réalisé avec le concours de M.G.BOSSY (Service de contrôle et qualité des eaux de la S.E.M.) que nous tenons à remercier ici.

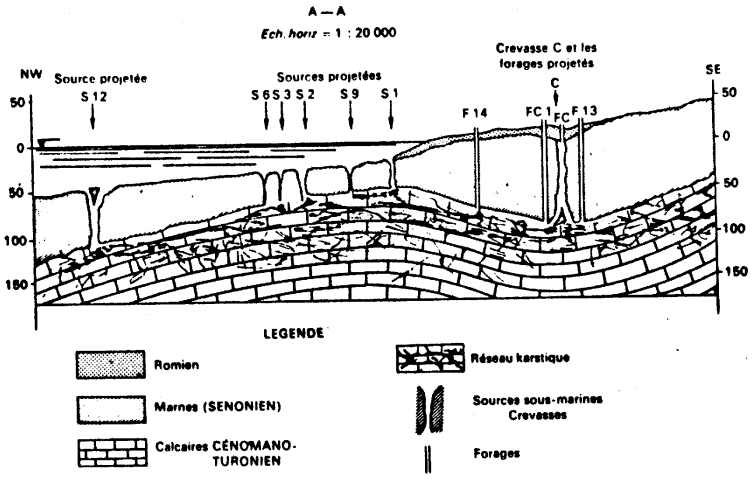


fig.12- Relations entre sources littorales et sous-marines à CHEKKA.
d'après MOULLARD (127)

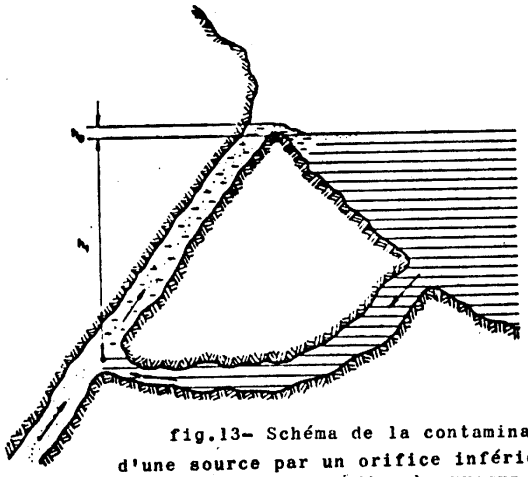


fig.13- Schéma de la contamination d'une source par un orifice inférieur.
d'après KUSCER (93)

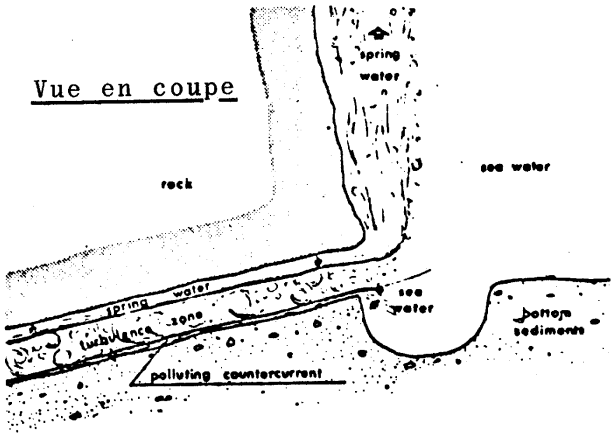


fig.14- Schéma de la contamination d'une source par son conduit de sortie.
d'après STEFANON (155)

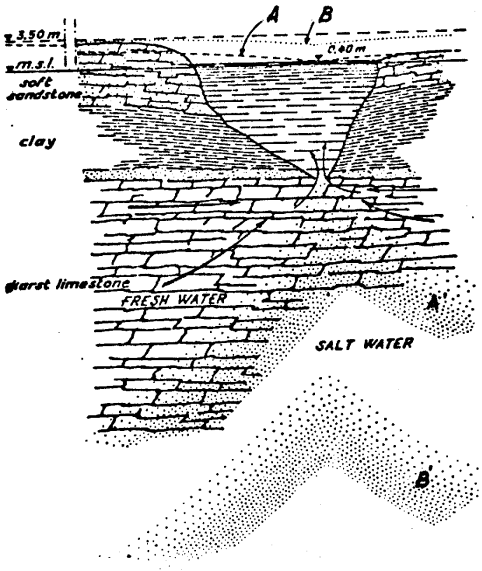


fig.15- Schéma de la contamination d'une source par perte de pression. d'après COTECCHIA (38)

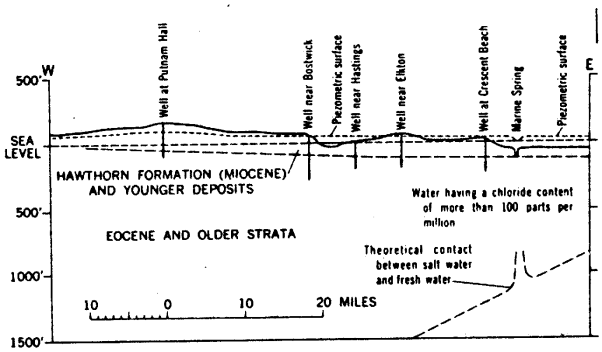


fig.16- Influence d'une source sur l'équilibre eau douce-eau salée.
d'après STRINGFIELD (157)

Present conditions of the artesian opening of Chidro spring and results which can be got by arising artificially the threshold and reducing consequently the spring yield.

From the researches carried out, the piezometric surface near the spring is 3.50 m above m.s.l.; in such conditions the theoretical interface is 112 m below sea level.

The curves labelled A and A' (B and B') represent respectively the piezometric hollow conoid and the salt water intrusion cone in the actual (future) condition.

précise des phénomènes d'échanges qui se produisent, ou risqueront de se produire dans cet aquifère, entre l'eau salée provenant de la mer et l'eau douce provenant du continent.

La nature des relations entre l'eau douce et l'eau salée a été décrite pour la première fois par BADON-GHYBEN en 1889 aux Pays-Bas, et observée de façon indépendante par HERZBERG en 1901 dans les iles de la mer du Nord. Plus tard quelques précisions ont été apportées par certains auteurs (HUBBERT, KUSCER, LUSCZINSKI) sans pour autant modifier de beaucoup le schéma proposé par BADON-GHYBEN et HERZBERG, schéma qu'elles ne font que nuancer et qui peut-être explicité de la façon suivante

- dans un réservoir aquifère littoral en relation avec la mer il se produit entre l'eau douce qu'il reçoit du continent et l'eau salée provenant du milieu marin, un équilibre qui est fonction, en chaque point du réservoir, de la charge de l'eau douce (H d) par rapport à celle de l'eau salée (Hs) et des densités respectives de l'eau douce (Yd) et de l'eau salée (Ys).

La condition de cet équilibre est réalisée lorsque

$$Hd\ Yd = Hs\ (Ys - Yd)$$

Remarque .

La figure 8b représente le schéma habituel donné en diverses publications pour illustrer le principe de GHYBEN-HERZBERG (avec ici des notations différentes Ntb pour He, tb pour Hd et p pour Y). On notera qu'en figure 8a le problème d'un tel équilibre ne se pose pas car on a affaire à un réservoir aquifère soutenu par un mur imperméable situé au niveau de la mer ; mais on notera surtout que L'élévation de la charge d'eau douce n'est, sur la figure 8b, que le sixième de ce qu'elle est sur la figure 8a, cette élévation ne pouvant être compensée dans ce dernier cas par un abaissement du contact eau douce- eau salée - ainsi que cela se produit en 8b - sous l'effet de cette charge : tout se passe comme si le support de l'eau douce était constitué, dans le réservoir de la figure 8b, par une membrane élastique.

Toute variation, positive ou négative, de la charge de l'eau douce (ou de celle de l'eau salée) entraînera donc automatiquement une rupture de cet équilibre et un réajustement progressif des rapports eau douce- eau salée jusqu'à ce qu'il satisfasse à nouveau à la relation de GHYBEN-HERZBERG.

Un tel réajustement implique donc que de l'eau se déplace dans le réservoir, la vitesse de ce déplacement et sa direction étant fonction de l'importance de la variation de la charge et de sa durée. On passe ainsi d'un schéma statique à un schéma dynamique

- si la variation de la charge d'eau douce est positive :
  (Hd yd - Hs (Ys - Yd) > 0), l'eau douce sortira du réservoir aquifère ;
- si elle est négative :
  (Hd yd - Hs (Ys - Yd) < 0), l'eau salée pénétrera dans ce réservoir.

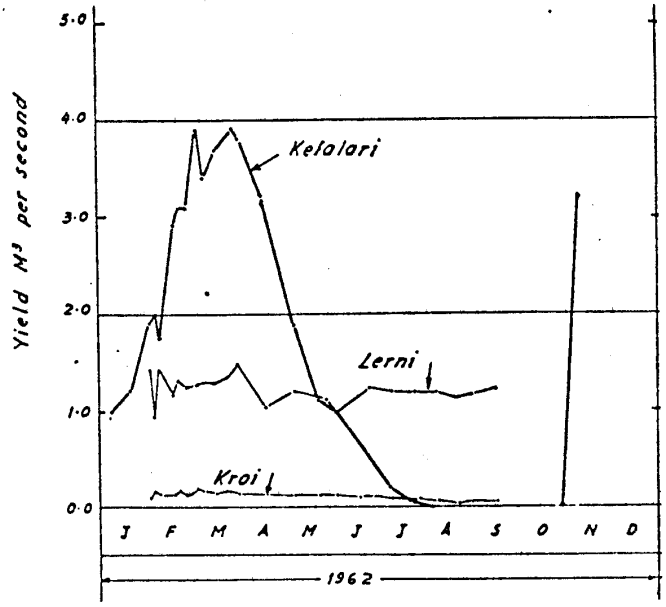


fig.17- Régime comparé de sources continentales et littorales d'après F.A.O. (55)

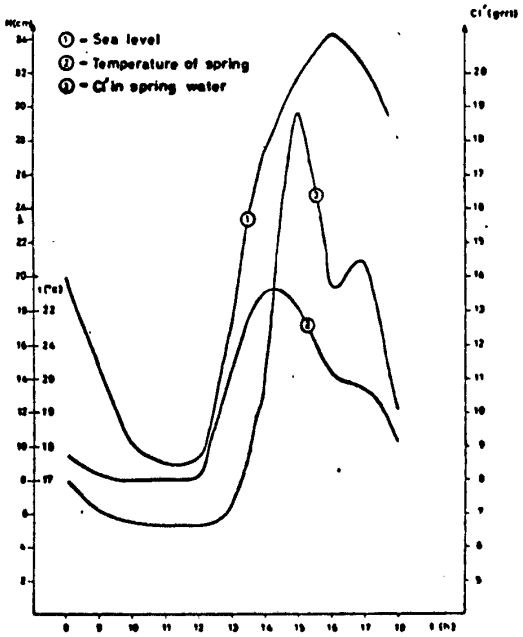


fig.18- Relations niveau marin, chlorures et températures de la source MARINA. d'après JEVREMOVIC (74)

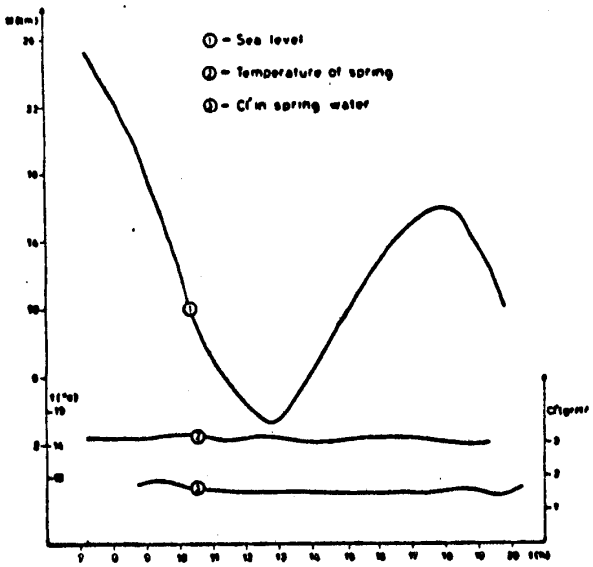


fig.19- Relations niveau marin, chlorures et températures de la source POLJICE. d'après JEVREMOVIC (74)

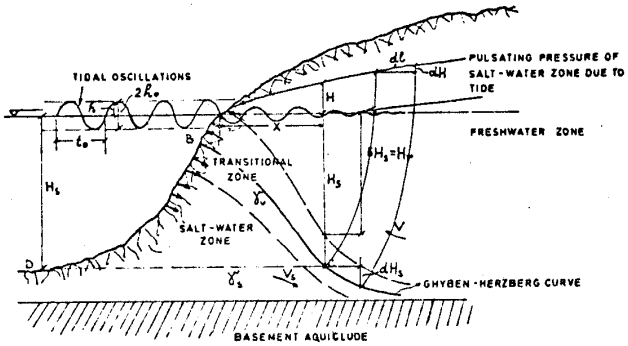


fig.20- Relations dynamiques eau douce-eau salée en réservoir aquifère littoral. d'après MIJATOVIC (115)

Malgré le caractère théorique de ce principe - auquel on fait le glus souvent le reproche de ne pouvoir s'appliquer en toute rigueur qu'à des liquides non miscibles et à des réservoirs de porosité homogène il faut constater que la quasi- totalité des auteurs font très largement appel à lui pour estimer ou rendre compte des rapports eau douce- eau salée dans les réservoirs qu'ils étudient : s'ils constatent des différences avec ce qu'ils observent effectivement sur le terrain par rapport à ce schéma théorique, ils les attribuent d'une part à des contraintes imposées par des conditions très diverses de perméabilité (164), d'autre part à l'existence d'une "zone de diffusion" (de préférence appelée "zone de transition") résultant du mélange des eaux douces et des eaux salées au voisinage de la surface théorique du contact eau douce- eau salée (= interface) : un tel mélange se produit essentiellement sous l'effet des mouvements que subit cette surface en raison des variations, plus ou moins continues et plus ou moins importantes, des charges respectives de l'eau douce et de l'eau salée (*). Il se crée ainsi - indépendamment de phénomènes de diffusion moléculaire qui ne paraissent pas ici devoir être pris en compte car ils n'ont pas d'effets comparables - un cycle de courant lié à la fois aux apports saisonniers d'eau douce sur le continent et aux fluctuations de la mer (78). Les figures 9 et 20 illustrent convenablement ce phénomène tandis que la figure 10 montre combien peut- être progressif dans un réservoir aquifère le passage de l'eau douce à l'eau salée et qu'elle peut être l'importance de la zone de transition : elle est, en Floride, dans le Biscayne Aquifer, de -quelques dizaines de mètres d'épaisseur (72).

En Italie (38) comme en Floride (78), les forages démontrent que l'on rencontre de l'eau moins minéralisée que l'eau de mer là où celle-ci, selon le schéma de GHYBEN-HERZBERG, aurait dû se trouver ; par contre la zone de transition monte plus haut dans la zone d'eau douce que ce qu'aurait laissé prévoir ce schéma. De même en Crête (58), au voisinage de la source d'Almyros, des forages profonds de 150 à 200 m ne rencontrent pas l'eau salée qui aurait dû se trouver au voisinage de la cote -20.

Remarque . Preuves *de l'origine marine d'une contamination par le sel*

Il existe différents processus de contamination d'un réservoir par le sel et il importe de pouvoir s'assurer de l'origine d'une telle contamination si l'on veut tenter de s'affranchir de ses effets.

Dans le Floridan Aquifer (cf. figure 11) la preuve de l'origine marine de l'invasion salée est notamment fournie par les anomalies, observées en forages, du gradient géothermique : on observe en effet un refroidissement de la température dans ta zone salée du réservoir correspondant à des entrées d'eau de mer provenant de la partie profonde, la plus froide, de la fosse de Floride.

Mais le plus souvent ce sont sur des critères chimiques que repose le diagnostic. outre la mesure des chlorures qui est surtout utilisée pour suivre l'évolution d'une contamination, la plupart des auteurs, en se basant sur le fait que les rapports entre matières dissoutes dans l'eau de mer sont constants, considèrent significatifs d' une contamination par celle- ci, des valeurs

---

* N.B.: S'agissant de causes essentiellement mécaniques c'est un phénomène de dispersion qui se produit ici et qui sera plus ou moins favorisé par les caractéristiques de porosité du réservoir. En outre, la température pourra également jouer un rôle en raison de son influence sur les densités des fluides en présence.

analogues obtenues pour ces mêmes rapports dans les eaux souterraines qu'ils étudient ; seule change la concentration (66) (*). Ainsi pour COTECCHIA (39), *les rapports Cl¯ / S04+ et Cl¯ Na+ + K+ sont de très bons indicateurs de l'existence d'une contamination marine. Selon BURDON (57) Les rapports* S32/S33 *n'étant pas les mêmes pour les eaux de pluie et pour Veau de mer, il devient possible d'évaluer l'origine de la contamination d'une source lorsque l'analyse seule du chlore ne permet pas de trancher. Toutefois LOVE (98) observe que le mélange de Veau salée et de l'eau douce ne correspond pas toujours exactement à une dilution de la première par la seconde et qu'il est de ce fait difficile de calculer le pourcent de l'une par rapport à l'autre dans un mélange, contrairement à ce qui a été fait par certains auteurs cités au paragraphe 1.2.4. : des phénomènes d'échange d'ions liés à la présence de matières en suspension seraient à l'origine des modifications constatées, particulièrement sensibles pour les cations.*

1.3.2. Aspects particuliers propres aux réservoirs aquifères calcaires

Ainsi que nous l'avons vu au paragraphe 1.1. se trouvent souvent associés dans un réservoir aquifère calcaire trois types de porosité (d'interstices, de fissures, de chenaux) dont les exutoires peuvent être plus ou moins nombreux et placés dans des situations très diverses par rapport au plan d'eau marin. I1 en résulte que de singulières complications vont apparaître, par rapport aux milieux de porosité homogène, quant aux relations eau douce- eau salée dans ces types particuliers de réservoir, complications aggravées par une notable irrégularité, le plus souvent, des écoulements d'eau douce dont ils sont le siège.

Nous rappelons d'abord les constatations des auteurs avant d'examiner avec eux les explications qu'ils proposent.

1.3.2.1. Constatation des auteurs

Les observations les plus instructives sont relatives d'une part à l'extension d'une contamination marine sur le continent à des distances souvent très éloignées du littoral , et d'autre part à des

---

* N.B.: Rappelons que l'eau de mer contient environ 35 °/oo de sels dissous. SVERDRUP (cité par A. LOMBARD in "Géologie sédimentaire. Les séries marines.' Masson et Cie Ed. Paris 1956) indique la composition suivante

Chlore	: 18,9799 °/oo
Sulfate	: 2,6486
Bicarbonate	: 0,1397
Brôme	: 0,0646
Sodium	: 10,5561
Magnésium	: 1,2720
Calcium	: 0,4001
Potassium	: 0,3800
Strontium	: 0,0133

soit au total 34,4543 °/oo (éléments principaux)

{une autre analyse est donnée dans BURDON (23)}.

phénomènes d'absorbtion d'eau de mer, permanents ou périodiques par des orifices de conduits karstiques.

Ainsi, en Grèce, BURDON (24) remarque la présence de sel en réservoir karstique à 9 km à l'intérieur du continent et sa présence en profondeur même lorsque le niveau statique de la nappe s'élève à la cote +62. Au Maroc (71), on observe à 500 m du rivage une minéralisation totale de 9 g/1 sur un piézomètre de la nappe de l'aquifère karstique de Oridrat dont la pente n'est que de 0,1 °/oo. En Italie (38), dans la région des Pouilles, toutes les sources littorales ont des minéralisations comprises entre 2 et 4 g/1 de C1-. En Floride (60), on note 1a présence des sources salées (jusqu'à 9 g/1 de C1-) à des distances du rivage pouvant atteindre plusieurs dizaines de kilomètres (certaines toutefois seraient plutôt liées soit à des dépôts de sel, soit à des eaux marines fossiles pouvant remonter au Pliocène). Nous avons déjà signalé (cf. paragraphe 1.2.4.) l'existence de sources, contaminées par l'eau de mer, à des altitudes comprises entre 0 et +27, de même que des absorbtions permanentes ou temporaires d'eau douce dont les plus célèbres sont celles des moulins d'Argostolion sur la côte occidentale de l' Ile de Céphalonie (cf. paragraphe 1.2.3.).

Ces dernières ont fait l'objet d'une expérience de coloration (109-110) qui a permis de démontrer leur relation avec des sources littorales situées sur la côte orientale de Céphalonie, à 15 km des pertes ; on notera l'apparent illogisme d'une telle relation puisque le niveau des pertes colorées varie entre les cotes -0,73 et -1,37 alors que les sources ayant restitué le colorant sont au niveau ou au- dessus du niveau de la mer.

.3.2.2. Explications proposées

Les faits observés dans les réservoirs aquifères calcaires littoraux s'accommodent- ils eux aussi des principes généraux régissant les relations eau douce- eau salée en réservoir souterrain tels qu'ils ont été exposés au début de ce chapitre ?

Dans le cas des calcaires, il est bien évident que toute contamination affectera le réservoir de façon hétérogène en fonction de la situation et de la dimension des vides qu'ils recèlent et selon les charges respectives de l'eau, douce ou salée, que ces vides peuvent écouler.

Ainsi on ne s'étonnera point que des contaminations puissent être constatées assez loin du rivage celles- ci pouvant être favorisées aussi bien par les nombreuses anastomoses du réseau karstique dans les trois dimensions, que par les sections importantes offertes souvent à l'écoulement par un conduit karstique, sections qui ne permettent pas en général, sauf en période de crue, la permanence de charges hydrauliques suffisantes pour contrarier la pénétration de l'eau de mer.

1.3.2.2.1. Cas des conduits karstiques considérés isolément

Lorsque des conduits karstiques de grande section débouchent directement dans le milieu marin il est de règle de constater, en raison du sur-dimensionnement de ces conduits par rapport aux volumes qu'ils ont à écouler en période d'étiage, une pénétration directe de l'eau de mer par leur partie inférieure - pénétration qui peut s'étendre notablement en amont du réservoir -tandis que les eaux provenant du continent continuent à s'écouler vers la mer par leur partie supérieure : c'était notamment le cas dans la rivière "sous-marine" de Port-Miou avant l'édification d'un barrage immergé ayant eu pour effet de bloquer cette contamination directe venant de l'aval (cf. figures 37 à 40).

Dans le cas où le réseau karstique possède plusieurs exutoires marins le régime de l'écoulement de l'eau douce - et par contre coup celui de l'eau salée - sera fonction de la situation respective des divers orifices par rapport au niveau de la mer l'écoulement de l'eau obéira alors à la loi du "moindre effort", c'est-à-dire qu'elle émergera là où la pression de l'eau de mer sera la plus faible.

Remarque

STEFANON (155) utilise la formule courante mentionnée au paragraphe 1.3.1. pour évaluer la charge hydraulique nécessaire à une source sous-marine pour qu'il y ait émergence. Cette condition est réalisée pour $h > \frac{D\,(S-W)}{W}$

avec h = *charge de la source au-dessus du niveau marin*
D = *profondeur de la source sous le niveau marin*
S = *poids spécifique de l'eau de mer*
W = *poids spécifique de l'eau de la source*

Utilisant le même principe, KAREH (76), constatant L'absence de sortie d'eau en période d'étiage sur la source S12 de Chekka située à la cote -45, alors qu'elle fonctionne en émergence en période de crue, évalue à +2,8 en hiver (où une charge de 45 m d'eau salée doit être vaincue) et à +5,8 en été (où la charge à vaincre est de 145 m, les 100 m d'épaisseur du toit argileux de l'aquifère étant alors pris en compte) les charges minimales nécessaires de l'eau douce pour qu'il y ait émergence.

Par contre les possibilités de pénétration d'eau de mer seront d'autant plus grandes que des orifices de conduits existeront en profondeur sous le niveau marin : les conséquences de cette pénétration par un orifice inférieur sont parfaitement illustrées par la figure 13 la facilité pour l'eau salée de pénétrer par un tel orifice inférieur a pour conséquence la contamination de l'eau évacuée par l'orifice supérieur.

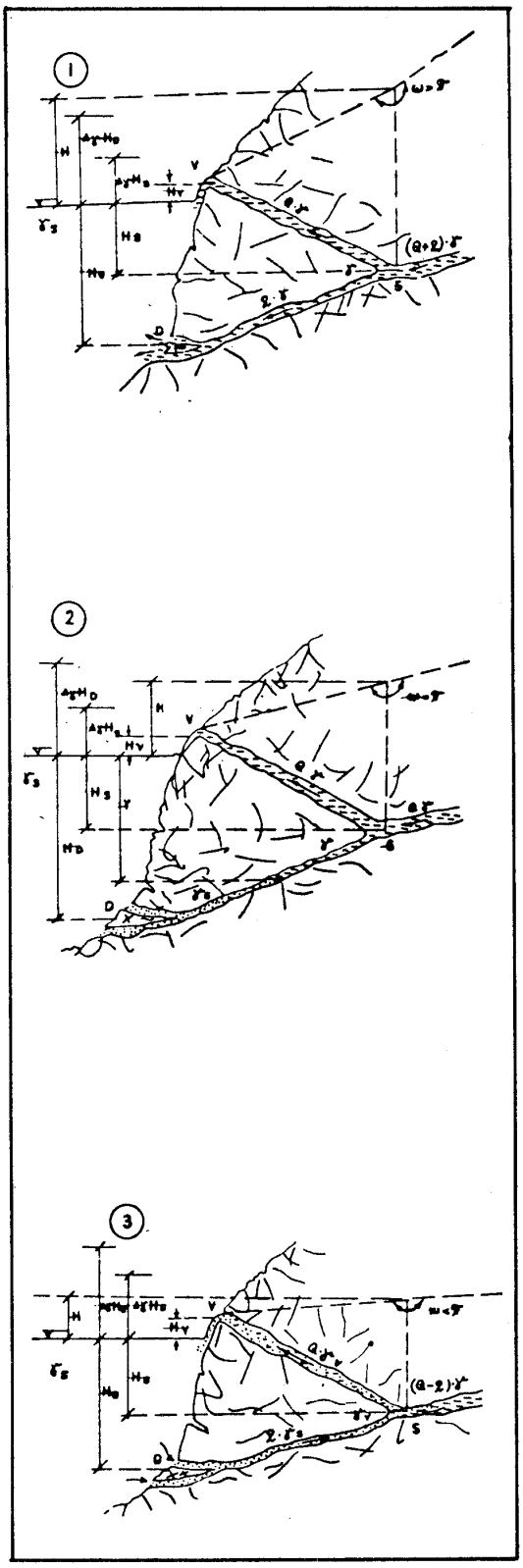


fig.21- Variations des conditions d'écoulement dans un réseau à orifices superposés. d'après MIJATOVIC (115)

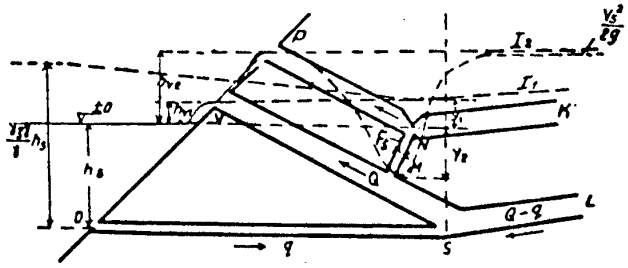


fig.22- Schéma de KUSCER d'un système karstique littoral. d'après MIJATOVIC (113)

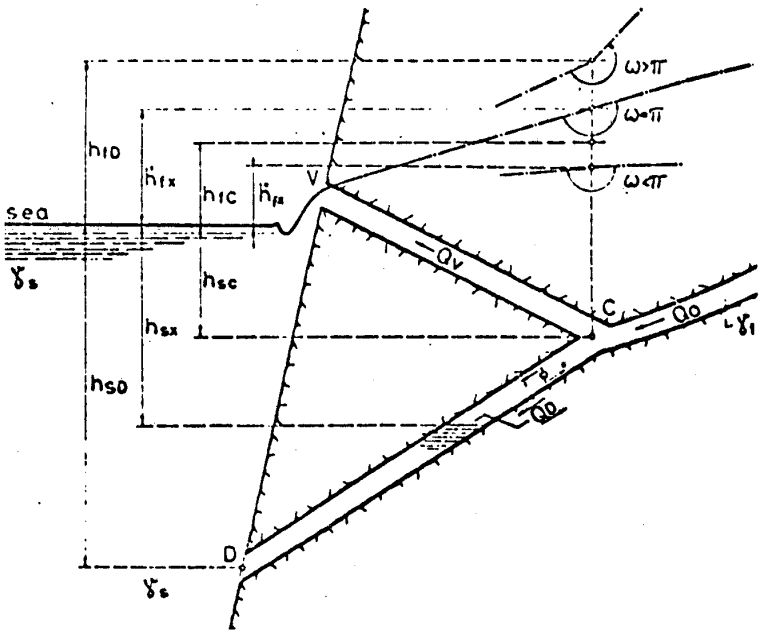


fig.23- Schéma des conditions d'écoulement dans un karst littoral. d'après PAVLIN (135)

Les divers schémas donnés en page 23 (figures 21, 22 et 23) constituent des modèles théoriques permettant de rendre compte du mécanisme de l'intrusion salée dans un réseau karstique à orifices superposés selon différentes valeurs de charges hydrauliques et selon la situation des points de diffluence. En ce qui concerne la figure 21, MIJATOVIC (115) précise que les diverses caractéristiques d'écoulement qui peuvent se présenter dans le système étudié sont les suivantes

- dans le cas n° 1 : écoulement d'eau douce dans les deux conduits du système

- dans le cas n° 2 : écoulement d'eau douce dans le conduit supérieur, eau stagnante dans le conduit inférieur

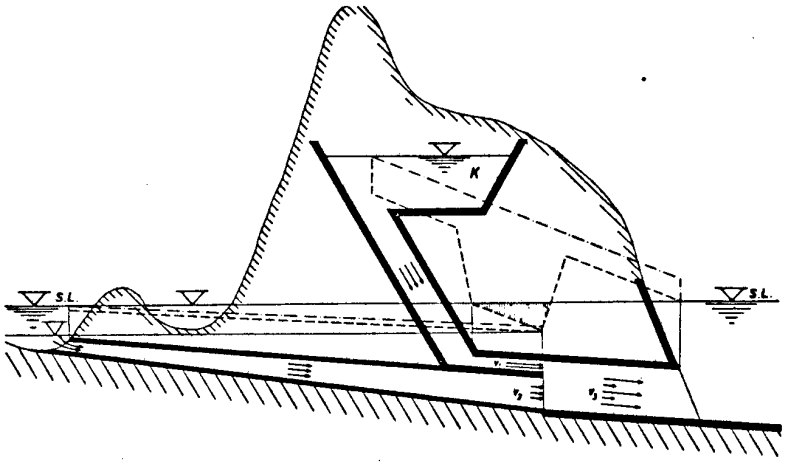
- dans le cas n° 3 : écoulement d'eau saumâtre dans le conduit supérieur sous l'effet de la pénétration d'eau de mer dans le conduit inférieur. Des formules simples exprimant ces diverses possibilités, sont proposées par l'auteur qui précise que la forme des collecteurs ne joue pas un rôle essentiel dans le processus qui est surtout lié à leur position relative.

En Crête, un modèle conçu par BAZIN (58) et basé sur les mêmes principes, a permis de préciser le mécanisme de la contamination de la source continentale d'Almyros à partir d'un conduit karstique supposé directement en relation avec la mer, conduit qui devrait se situer d'après les calculs à une profondeur voisine de 300 m.

En Céphalonie, deux modèles ont été utilisés pour tenter de rendre compte, sur des bases différentes, des phénomènes d'absorption observés à Argostolion : le premier (figure 24) s'appuie uniquement sur un principe hydraulique, principe selon lequel toute arrivée d'eau à pression élevée, dans un système comportant de faibles différences de charge hydraulique entre ces deux extrémités, peut provoquer dans ce système, sous certaines conditions de forme des sections des conduits en présence au point de confluence, un écoulement allant du point bas au point haut du système considéré ; l'autre, au contraire, (figure 25) ne faisant appel,qu'aux échanges eau douce-eau salée et aux mouvements qui se produisent dans la partie profonde du réservoir aquifère (zone de transition). Ce dernier schéma offre de très grandes analogies avec celui que le même auteur (STRINGFIELD - 158) propose pour expliquer la contamination périodique du lac Tarpon, en Floride, par les conduits profonds reliant ce dernier à la source temporaire Bayou, conduits transitant en partie par la zone contaminée du réservoir (cf. figures 26 et 27).

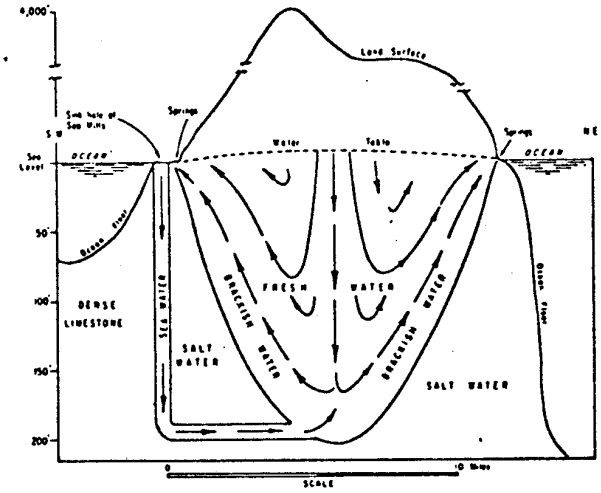
3.2.2.2. Cas des conduits karstiques associés aux porosités d'interstices et de fissures fissures

Ce cas est en fait le plus fréquent car il est rare que la porosité de chenaux se rencontre seule dans un réservoir aquïfère. Les explications fournies au paragraphe précédent sont également applicables ici en ce qui concerne les conduits, mais il s'y ajoute les phénomènes hydrauliques propres aux milieux poreux homogènes, interstices et fissures pouvant être ici assimilés, en première approximation, du point de vue de leur comportement aquifère. Les conditions de l'écoulement de l'eau en général et de la contamination par l'eau



– Scheme of hydraulic working of the "Sea-mills of Argostolion".
K = Schematic karst water body, in reality flowing along numberless clefts.
–.–.– Energy gradient
---- Hydraulic gradient
▥▥▥ Zone of hydraulic gradient below sea level
$V_1 \gg V_3 > V_2$

fig.24- Modèle hydraulique du système karstique de Céphalonie. d'après MAURIN (110)



Schematic cross section of island of Cephalonia showing movement of sea water downward into cavernous zone where it mixes with fresh water and rises in the zone of diffusion to springs along the coast.

fig.25- Schéma d'écoulement du système karstique de Céphalonie. d'après STRINGFIELD (158)

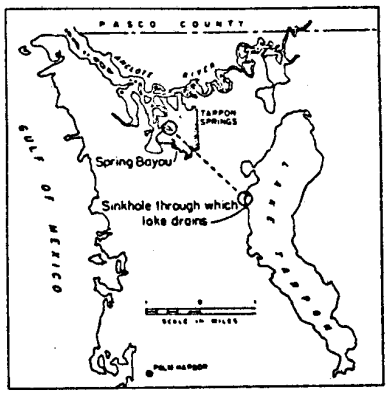


fig.26- Situation de la source BAYOU et du lac TARPON. d'après STRINGFIELD (158)

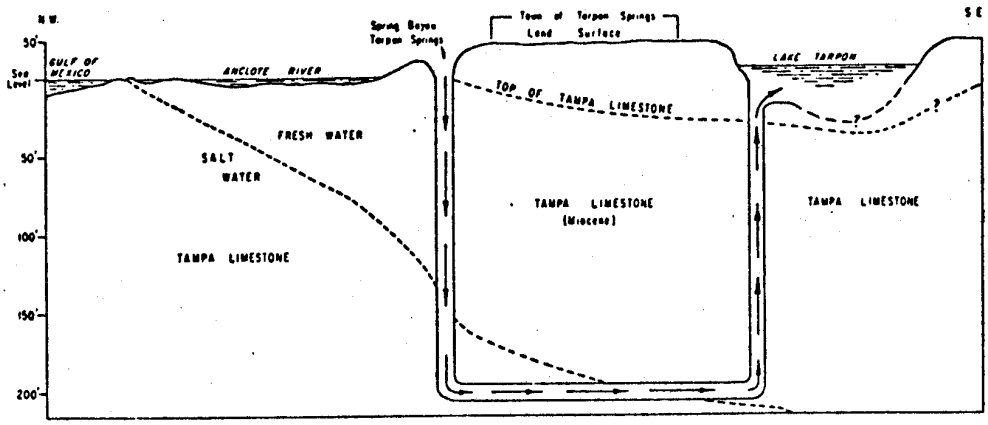


fig.27- Système hydraulique du lac TARPON. d'après STRINGFIELD (158)

de mer en particulier seront ici la conséquence des rapports existants, dans le temps et dans l'espace, entre les différents types de vide du réservoir.

En particulier, ainsi que cela a pu être démontré par de nombreuses études conduites en réservoirs calcaires sur le continent, le réseau de chenaux se comporte comme un drain en période d'étiage et comme un injecteur en période crue, vis- à- vis du réservoir plus finement poreux au sein duquel il se développe. Selon la position de ce drain par rapport au niveau de la mer, c'est- à- dire par rapport à la zone de contamination dont les auteurs constatent l'existence dans la partie finement poreuse des réservoirs calcaires -contamination analogue à celle qui se produit dans les milieux poreux non calcaires - il y aura en dehors des périodes de recharge, si le réseau Karstique est développé dans la zone ainsi contaminée, drainage de cette partie contaminée par ce dernier : ainsi s'expliquent à la fois la régularité relative de certaines sources littorales et sous- marines et une certaine constance du taux de leur contamination en période d'étiage.

Remarque .

Les grandes élévations de charge hydraulique qui se produisent au niveau des conduits karstiques en période de crue sont infiniment moins sensibles au niveau du milieu poreux environnant et d'autant moins que l'on s'éloigne des conduits : les crues étant en général de courte durée, c'est un rôle de drain qu'assurent le plus souvent les conduits karstiques, d'où une possibilité de contamination à peu près constante durant tout l'étiage si le conduit est développé, pour une certaine part, dans la partie profonde, contaminée, d'un réservoir : ce qui compte donc ici, plus que la morphologie du réseau karstique, c'est sa situation et son extension en-dessous du niveau marin.

<u>En ce qui concerne plus spécialement le régime hydraulique</u> des sources karstiques littorales et sous- marines, on soulignera que l'existence à terre de sources de trop plein aura pour effet de restreindre à leur aval, dans les parties les plus profondes du réservoir, le bénéfice attendu d'un lessivage des eaux salées et d'une recharge en eau douce tels qu'ils pourraient se produire en l'absence de telles sources. Ainsi dans un réseau karstique comportant plusieurs exutoires, les irrégularités, aussi bien du régime que de la contamination, seront le fait des exutoires les plus hauts tandis qu'une certaine tendance à la régularité sera au contraire caractéristique des exutoires les plus bas. L'exemple donné en figure 17 permet de constater les conditions différentes du régime des exutoires se rattachant à un même réseau grande régularité du débit de la source littorale de Kroi par rapport à celles de Lerni (Z = +1,5) et de Kephalari (Z = +23) de plus en plus éloignées du rivage. Précisons que selon COTECCHIA (38), une telle régularité de régime serait favorisée par l'effet de stockage supplémentaire de l'eau reçue en crue par la partie finement poreuse du réservoir calcaire par abaissement de l'interface et diminution corrélative du débit de crue de la source ; en étiage, il y aurait réajustement des conditions d'équilibre eau douce-eau salée, d'où un relèvement du débit de la source : un réservoir aquifère contaminée jouerait ainsi un rôle analogue à celui d'un barrage régulateur.

Dans le cas de sources ascendantes, la diminution de charge hydraulique qui se produit aux alentours d'une source, d'une manière comparable à ce qui s'observe au voisinage d'un puits en cours de pompage, favorise la contamination de l'eau écoulée par modification de l'équilibre eau douce- eau salée un tel phénomène est illustré par les exemples donnés en figures 15 et 16.

2. TECHNIQUES D'ÉTUDES ET DE CÀPTAGE

Bien qu'un nombre relativement faible d'études poussées aient été réalisées à ce jour dans le domaine des sources littorales et sousmarines - et plus généralement en aquifères calcaires littoraux - et malgré la rareté des aménagements exécutés à la suite de ces études - aménagements pratiquement tous réalisés à titre expérimental - on peut faire état d'un certain nombre de méthodes utilisables tant pour les recherches préalables nécessaires que pour l'exécution, selon leur nature, des travaux qui peuvent y être-conçus.

Cette méthodologie est basée sur les résultats des diverses expériences dont nous avons pu avoir connaissance, la plupart conduites en régions méditerranéennes et spécialement, en France, sur le site de Port- Miou.

Sans avoir à énumérer les diverses techniques qui doivent être mises en oeuvre à l'occasion de toute étude hydrogéologique, nous n'examinerons ici que celles qui sont plus particulièrement spécifiques du domaine qui nous intéresse - ou les mieux susceptibles de faire progresser nos connaissances sur ce domaine - étant bien entendu que l'étude d'un aquifère karstique littoral doit être abordée, et menée à bien, comme celle de tout autre aquifère en zone continentale.

2.1. Techniques d' d'études

Elles ont pour objectifs la connaissance précise du réservoir (géométrie, paramètres hydrauliques, conditions aux limites, organisation du drainage) et celle du régime de l'eau souterraine du double point de vue hydraulique et physico - chimique selon la situation et les relations de ce réservoir par rapport à la mer. Nombreux sont donc les points qu'il convient d'étudier pour atteindre ces objectifs, mais nous ne signalerons ici que les méthodes relatives à la détection et à la connaissance des sources sous- marines et de leurs conduits, c'est- à- dire celles plus spécialement propres à l'étude d'un Karst sous- marin.

2.1.1. Détection des sources sous- marines *

Les techniques utilisées reposent toutes sur l'existence de contrastes (densité, conductivité électrique, températures etc.) dans le milieu étudié, qu'il soit marin ou continental.

---

* Il va de soi que les informations recueillies auprès, d'observateurs, locaux (tels des pêcheurs) quant à l'existence de sources sous- marines. doivent être prises en compte mais doivent être contrôlées.

Remarque .

Nous rappelons que la localisation de bon nombre de sources sous -marines est parfois relativement aise en raison de certains effets "visibles" auxquels elles donnent lieu (agitation du plan d'eau, "effet de glycérine" dû à des différences d'indice de réfraction, présence d'une flore aquatique spécifique, agitation des particules solides du fond marin . . .).

2.1.?.1. Densimétrie

La méthode basée sur les différences de densité entre deux liquides ne parait avoir été utilisée que par PALAUSI (130) sur le littoral de la côte d'Azur. L'auteur utilise un aréomètre pour évaluer des valeurs comprises entre 1,04 (densité de l'eau de mer) et 0,99 (densité de l'eau douce),et apprécier la proportion d'eau douce dans l'eau de mer. L'intérêt de cette méthode est que l'influence de la température est pratiquement nulle dans cette mesure ; en effet les densités sont respectivement de

- 0,99 pour l'eau douce et 1,0356 pour l'eau de mer à 15° - 0,998 pour l'eau douce et 1,0332 pour l'eau de mer à 24°

Plusieurs résurgences auraient ainsi été repérées par l'auteur.

2.1.1.2. Conductimétrie

La mesure de la conductivité - ou de son inverse la résistivité - a été plus souvent utilisée, soit en procédant ponctuellement ("in situ" ou après échantillonnage - 149), soit de façon continue, avec possibilité d'enregistrement (32, 46). Fonctions de la quantité de sels dissous (*), mais aussi de la température, les conductivités de la zone étudiée ne seront significatives que si les températures réelles de Veau de mer ont été relevées. Précisons que pour une température voisine de 20° une augmentation de teneur en ClNa de 2 g/1 provoque une diminution de résistivité de 1 ohm.cm et inversement ; pour une concentration égale une augmentation de température de 1° provoque une diminution de résistivité de 1 ohm-cm (selon CLUSEAU, 32).

Le bateau utilisé devra effectuer un quadrillage systématique de la zone à étudier, la densité des points ou des itinéraires étant fonction de l'importance.du problème étudié et des indices dont on dispose. Les résultats obtenus (cf. figure 28) permettent l'élaboration de cartes de localisation des anomalies ou de cartes en courbes (isorésistantes, isothermes). Les investigations peuvent être faites à faible profondeur sous le plan d'eau (de l'ordre de 1 à 2 m pour atténuer les effets de surface) si l'épaisseur de l'eau n'est pas très grande au- dessus des points d'émergence.

---

* On peut également étudier directement les. anomalies chimiques de l'eau de mer suivant certains profils à diverses profondeurs ; des cartes, de ces anomalies dressées en U.R.S.S. ont permis de localiser des sources sous-, marines (165).

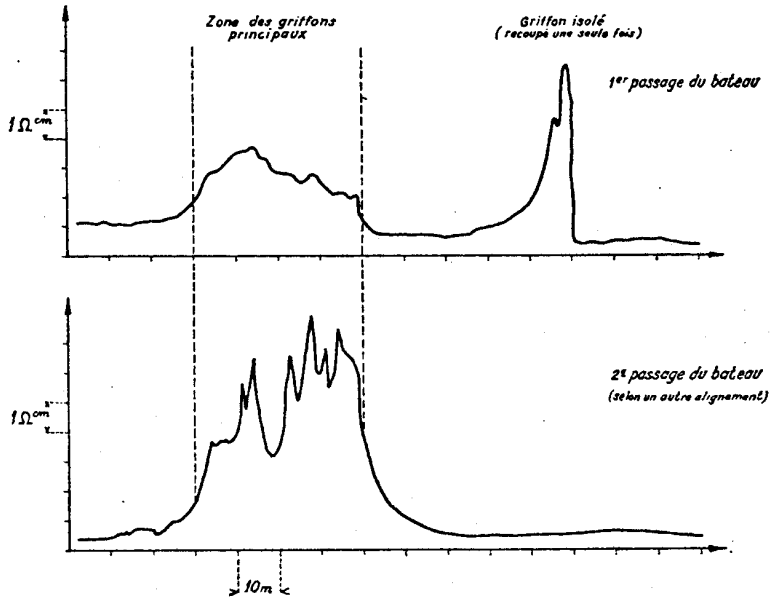


fig.28- — Répérage en mer des émergences du Liouquet par enregistrement de résistivité. Mesures effectuées à la cote-3 (Fond de la mer à -7)

d'après DUROZOY (51)

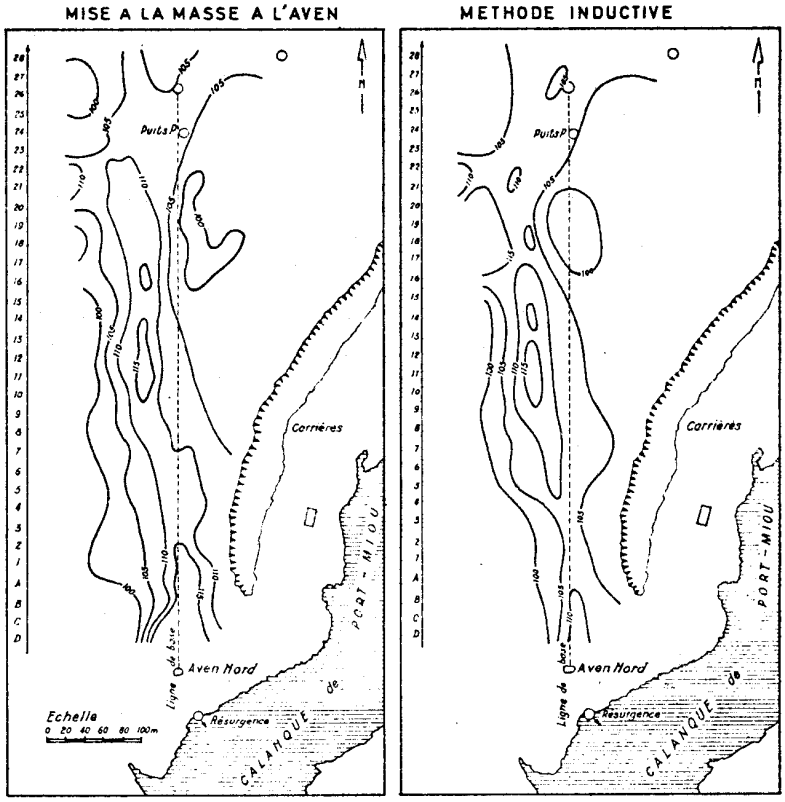


fig.29- — Mesures électromagnétiques paramétriques sur le karst de Port-Miou

En effet, la probabilité de mettre en évidence des contrastes sera d'autant plus grande que la perturbation apportée par la venue d'eau douce intéressera une plus grande surface : c'est ce qui se passe au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'émergence avec bien entendu pour corollaire une diminution des contrastes sous l'effet d'un mélange progressif avec l'eau de mer x.

L'expérience montre en effet (32) qu'au niveau des émergences, bien que les contrastes y soient les plus élevés, il n'y a pratiquement aucune chance, si l'on ne dispose que d'un seul capteur, de mettre en évidence des anomalies à moins de travailler par fonds n'excédant pas 10 m. Des équipements spéciaux sont à l'étude qui pourraient permettre un ratissage sur une plus grande largeur à des profondeurs plus importantes.

2.1.1.3. Radiométrie infra-rouge

Technique récente, appelée à de nombreuses applications, elle a déjà été utilisée en de nombreux pays pour l'étude des karsts littoraux (6, 29, 30, 132, 138, 139, 140, 147, 167). Basée sur la mesure, par avion, des contrastes de température qui existent à la surface de l'eau (la couche intéressée est de l'ordre de 1 mm d'épaisseur), elle permet d'obtenir une image thermique à partir d'un enregistrement des radiations émises dans l'infra-rouge (3 à 5 u ou 8 à 14 u), alors que la photographie infra-rouge est seulement sensible à l'infra-rouge réfléchi (0,7 à 0,9 u) (167).

Selon la restitution des documents au sol, on peut avoir

- un enregistrement négatif dont le tirage sur papier est positif,

- un enregistrement positif dont le tirage sur papier est négatif.

Dans le premier cas, les parties les plus chaudes sont blanches, et les moins chaudes sont noires sur la photographie (c'est l'inverse dans le deuxième cas.

I1 est également possible d'obtenir avec des films spécialement traités, des émulsions sélectives des émissions infra-rouges, restituées en supprimant certaines émulsions : ce procédé dit "fausses couleurs" constitue une méthode de repérage plus qualitative mais donne d'excellents résultats (138).

En ce qui concerne la radiométrie infra-rouge, HAKIM (167) précise en outre que pour une même température de l'eau salée et de l'eau douce, l'émission infra-rouge sera dissemblable : l'eau de mer, plus émissive, paraîtra plus chaude (émissivité de l'eau de mer : 0,98 ; de l'eau douce : 0,96 ; d'une eau polluée : 0,95). Les meilleurs conditions d'étude, selon le même auteur, seraient les suivantes

- la nuit, entre 20 h et 5 h du matin, I

- une altitude de vol comprise entre 1 300 et 2 000 m (permettant une largeur de zone analysée de 2,5 à 4 km),

- une période favorable du point de vue du débit des sources (des débits élevés fournissant en général les contrastes les plus forts).

(W) On notera toutefois qu'un tel mélange ne s'opère pas facilement en raison de "l'imperméabilité" relative de l'eau de mer vis à vis de l'eau douce ; ce mélange ne se produit qu'au prix d'un brassage vigoureux des eaux en présence.

Relevons toutefois qu'absence de contraste thermique ne signifie pas absence de sources sous-marines dans une région étudiée, le contraste pouvant être insuffisant, ou masqué par des effets parasites, pour pouvoir être décelé.

A cet égard, il est recommandé d'envisager la mise en oeuvre de la méthode d'une part en saison chaude, d'autre part en saison froide, pour pouvoir bénéficier de conditions climatiques extrêmes et espérer de meilleurs contrastes.

En outre, il est indispensable de procéder systématiquement au contrôle "in situ" des anomalies révélées - par échantillonnage pour analyses d'eau par exemple - pour être tout à fait sûr qu'elles se trouvent liées à des venues par sources sous-marines.

Remarque

Ce sont des procédés classiques qui doivent être mis en oeuvre pour la mesure des températures en profondeur, la technique infra-rouge ne S'appliquant qu'à la pellicule superficielle de l'eau de mer. On utilise en U.R.S.S. des colonnes supportant des thermistances à différents niveaux pour mesurer l'évolution des diverses températures de l'eau selon une verticale (165). Au Liban, la mesure directe en profondeur par sondes thermométriques a permis d'observer des anomalies jusqu'à 160 m au-dessous du niveau de la mer, anomalies qui seraient l'indice, selon GRUVEL (67) de sources sous-narines. De façon générale, les auteurs constatent que les sources sous-marines varient très peu de température ce qui corrobore les observations de régime et de minéralisation présentées au paragraphe 1.3.2.2.2.

2.1.1.4. Sismique réflexion

Cette méthode, encore peu utilisée (U.S.A., Sénégal), parait susceptible de fournir de bons résultats, notamment dans le cas de venues trop profondes pour provoquer des effets sensibles en surface, c'est-à-dire des anomalies. Elle est basée sur l'existence de discontinuités d'ordre physique entre des eaux de nature différente : ainsi la surface de discontinuité crée en mer entre eau douce et eau salée au voisinage d'une source, eaux de masses spécifiques différentes, est susceptible de constituer un plan de réflexion aux ultra-sons. Cette méthode serait effectuée en deux phases

- un dégrossissage par balayage continu selon une bande de 600 m de part et d'autre du bateau,

- un repérage précis dans les secteurs ayant fait apparaître de tels plans de réflexion ne correspondant pas au fond marin. (D'après informations orales communiquées par M. HORN, ingénieur géophysicien au B. R. G. M.).

2.1.2. Détection-des-conduits-karstigues

2.1.2.1. Apports de-la plongée souterraine

Les progrès accomplis depuis l'apparition de cette technique ont déjà permis, et permettront encore davantage dans l'avenir, de recueillir des données indispensables aux études et projets d'aménagements en domaine littoral, et de procéder même à des équipements et travaux en milieu immergé. De telles plongées, déjà réalisées en grand nombre sur divers sites de sources sous-marines - ainsi que sur des sources littorales - ont fourni la preuve que se retrouvaient, aujourd'hui enfouis sous le niveau de la mer, des réseaux karstiques analogues à ceux reconnus sur le continent et ont permis de préciser leurs caractéristiques diverses indispensables à prendre en compte dans les études en domaine littoral : morphologie des exutoires et des conduits, situation du réseau par rapport à son réservoir et au niveau de la mer, facteurs de localisation, nature et âge des remplissages, caractéristiques physiques et chimiques des écoulements etc...

Aussi convient-il de généraliser, ainsi qu'on le fait à terre, l'emploi de la plongée à l'occasion de toute étude : un certain nombre de sources sont en effet susceptibles de se révéler pénétrables, de telles pénétrations favorisant dans tous les cas aussi bien la connaissance du milieu karstique immergé que la recherche de solutions en vue de travaux d'aménagement, ainsi que cela a pu être fait à PortMiou (138). En particulier ont pu être mises au point sur le site de PORT-MIOU les techniques de la plongée et celles des mesures en milieu noyé (vitesse, charge hydraulique, température, conductivité), mesures qui se révèlent tout à fait indispensables à la conduite d'une étude dans un karst littoral.

2.1.2.2. Méthodes géophysiques seules possibles

Lorsqu'un réseau karstique n'est pas accessible à l'homme, ce qui est malheureusement encore souvent le cas, on sait que la difficulté de déterminer son tracé de façon indirecte à partir de la surface topographique, constitue le défaut majeur des études hydrogéologiques, et un obstacle souvent à la réalisation de travaux d'aménagement tels qu'on peut les mener à bien en d'autres types de réservoir.

Si les méthodes géophysiques peuvent apporter un certain nombre d'informations très importantes, telles les conditions aux limites d'un réservoir, c'est-à-dire sur sa géométrie et la nature des terrains qui l'encadrent, telles parfois le degré de fissuration ou d'altération de la roche ainsi que l'existence des principaux accidents tectoniques qui l'affectent, elles restent encore peu susceptibles de fournir des indications précises, sauf exceptions,en ce. qui concerne la localisation des conduits karstiques, et spécialement des conduits profonds: on ne peut que souhaiter qu'à la suite d'efforts nouveaux de recherche des progrès soient accomplis dans cette voie difficile

En domaine littoral, les méthodes électriques et électromagnétiques bénéficient toutefois d'un avantage particulier, lié à la contamination par l'eau de mer s celle-ci ayant une résistivité de 0,25 ohm.m, sa présence dans les calcaires abaisse leur résistivité, normalement comprise entre 250 et 600 ohm.m, à quelques ohm.m : ainsi peuvent être localisées facilement les zones d'invasion salée.

En ce qui concerne les conduits, signalons que les diverses méthodes électro-magnétiques mises en oeuvre à Port-Miou ont tout de même apporté des indications relativement précises sur la direction générale de la galerie immergée (cf. figure 29), direction qui a été confirmée à peu près par la suite par les résultats de nouvelles progressions obtenues par les plongeurs.

2.1.2.3. Méthodes géophysiques combinées avec la plongée

On citera ici une technique maintenant d'usage courant permettant de localiser avec grande précision, à partir de la surface topographique, un ou plusieurs points accessibles à l'homme dans un réseau karstique, que ces points soient au-dessus ou au-dessous de la surface de l'eau dans le conduit.

Seule une trop grande épaisseur de terrain pourrait restreindre l'emploi de la méthode, qui n'a été testée jusqu'à présent que sur des épaisseurs n'excédant pas une centaine de mètres.

On utilise la propriété d'une boucle horizontale alimentée par un courant alternatif - ou d'un barreau aimanté - de produire un champ magnétique dont la mesure en surface des composantes horizontales et verticales permet de déterminer la position (150-152). Ainsi, à Port Miou, a-t-il été possible de situer avec exactitude un point situé à 500 m de l'exutoire en mer que les difficultés inhérentes à la plongée ne permettaient pas de situer avec assez de précision pour que puissent être entrepris les travaux d'aménagement souhaités en ce point (138).

2.1.3. Autres-technigues-d'études

Nous rappellerons ici, pour mémoire, des techniques largement en usage en milieu continental qui offrent un intérêt particulier en milieu littoral et sous-marin

- il s'agit d'une part des opérations de traçage dont on sait l'intérêt qu'elles présentent pour la démonstration de relations hydrauliques supposées ; indiquons toutefois que des échecs ont été constatés pouvant être dus soit aux conditions particulières d'écoulement dans un karst immergé, soit à l'emploi de traceurs ne convenant pas (en particulier il serait intéressant que des précisions soient apportées quant au choix des traceurs les mieux décelables en milieu salé) ;

- il s'agit d'autre part d'opérations de datation qui, dans le cas des sources sous-marines, pourraient apporter d'utiles données sur les temps de cheminement et sur l'origine de l'eau écoulée. En Floride, de telles informations ont été obtenues par des mesures de teneur en tritium et en carbone 14 (157), de même en Grèce par l'étude des rapports de concentration oxygène 16 et oxygène 18 (57) ;

- il s'agit enfin de l'ensemble des méthodes qui permettent de tenter d'évaluer les entrées d'eau dans un système aquifère afin d'en définir les ressources - donc les prélèvements possibles - et les caractéristiques d'écoulement : il est bien évident que les débits écoulés par un karst littoral doivent être connus avec une précision acceptable - ce qui est rarement possible de façon directe et continue - afin que puisse être apprécié l'intérêt économique.du système étudié, intérêt qui peut être très inégal.

2.2. Techniques de captage

2.2.1. Essai d'inventaire des travaux existants

2.2.1.1. Sur des sources sous-marines

Pouvoir utiliser les sources sous-marines à des fins de consommation figure, depuis longtemps, parmi les préoccupations de l'homme. On rapporte ainsi que dès l'antiquité les habitants de la ville de Tyr pouvaient s'approvisionner en eau potable, issue d'une source sous-marine, en utilisant des récipients spéciaux transportés sur des barques jusqu'à l'emplacement de la source (94).

De nos jours, on connait l'utilisation faite des sources de Bahrain, dans le golfe Persique, pour l'alimentation en eau de régions de l'Arabie situées jusqu'à 400 km plus à l'Ouest : des vendeurs d'eau viennent la recueillir à l'emplacement de ces sources à l'aide d'outres en peau de chèvre remplies parfois par l'intermédiaire de tubes enfoncés dans les griffons (82). Dans le golfe de Carpentaria, situé dans la partie nord de l'Australie, c'est à l'aide de bambous que la population locale prélève l'eau de sources sous-marines (165).

Pourtant il faut bien constater, qu'en dehors de ces cas particuliers de prélèvement de type très rudimentaire - et dont on ne sait pas d'ailleurs s'ils peuvent être réalisés de façon permanente ... et selon quelles caractéristiques de volume et de qualité - que très rares paraissent être les captages de source sous-marine existant aujourd'hui dans le Monde Nous n'en avons relevé que trois dans la bibliographie consultée (encore conviendrait-il de vérifier nos informations sur ceux signalés en Italie) : l'un en Italie, à Trieste, à partir de la source sous-marine d'Aurisina située à 1 m sous le niveau de l'Adriatique (25) ; l'autre, lui aussi en Italie à La Spezia, à partir de la source sous-marine de Cadimare située à 6 m sous le niveau de la Méditerranée (25) ; le troisième en France, près d'Yport, à partir des sources littorales du même nom, situées sur l'estran et plus ou moins recouvertes par la Manche selon l'état de la marée (13) (cf. figure 35).

Quant aux autres travaux d'aménagements réalisés à ce jour sur des sources sous-marines, ou sur leur conduit d'arrivée, ils sont également très peu nombreux, et répondent à deux objectifs principaux

- ouvrages expérimentaux destinés à tester en vraie grandeur le comportement hydraulique du réservoir aquifère sous l'effet de l'ouvrage, tout en permettant la mise au point des techniques particulières à sa réalisation : tels sont les cas du barrage immergé de la galerie de Port Miou (138) (cf. figure 39) et de la digue exécutée autour de la source littorale d'Ayos Yeoryios, près d'Argos dans le Péloponèse, digue de grande ampleur mais sur les caractéristiques de laquelle nous manquons encore:. de précisions (informations orales de M.ANDREADIS et de Melle COTSOVINOU, ingénieurs au ministère des Travaux publics à Athènes).

- dispositifs de prélèvement qui consistent à dériver, au moyen d'une conduite dont une extrêmité est mise en place dans le griffon tandis que l'autre rejoint la surface de l'eau, une fraction de l'écoulement afin de pouvoir effectuer des mesures (charge, salinité, température)

En effet, la probabilité de mettre en évidence des contrastes sera d'autant plus grande que la perturbation apportée par la venue d'eau douce intéressera une plus grande surface : c'est ce qui se passe au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'émergence avec bien entendu pour corollaire une diminution des contrastes sous l'effet d'un mélange progressif avec l'eau de mer x.

L'expérience montre en effet (32) qu'au niveau des émergences, bien que les contrastes y soient les plus élevés, il n'y a pratiquement aucune chance, si l'on ne dispose que d'un seul capteur, de mettre en évidence des anomalies à moins de travailler par fonds n'excédant pas 10 m. Des équipements spéciaux sont à l'étude qui pourraient permettre un ratissage sur une plus grande largeur à des profondeurs plus importantes.

2.1.1.3. Radiométrie infra-rouge

Technique récente, appelée à de nombreuses applications, elle a déjà été utilisée en de nombreux pays pour l'étude des karsts littoraux (6, 29, 30, 132, 138, 139, 140, 147, 167). Basée sur la mesure, par avion, des contrastes de température qui existent à la surface de l'eau (la couche intéressée est de l'ordre de 1 mm d'épaisseur), elle permet d'obtenir une image thermique à partir d'un enregistrement des radiations émises dans l'infra-rouge (3 à 5 u ou 8 à 14 u), alors que la photographie infra-rouge est seulement sensible à l'infra-rouge réfléchi (0,7 à 0,9 u) (167).

Selon la restitution des documents au sol, on peut avoir

- un enregistrement négatif dont le tirage sur papier est positif,

- un enregistrement positif dont le tirage sur papier est négatif.
  Dans le premier cas, les parties les plus chaudes sont blanches, et les moins chaudes sont noires sur la photographie (c'est l'inverse dans le deuxième cas.

I1 est également possible d'obtenir avec des films spécialement traités, des émulsions sélectives des émissions infra-rouges, restituées en supprimant certaines émulsions : ce procédé dit "fausses couleurs" constitue une méthode de repérage plus qualitative mais donne d'excellents résultats (138).

En ce qui concerne la radiométrie infra-rouge, HAKIM (167) précise en outre que pour une même température de l'eau salée et de l'eau douce, l'émission infra-rouge sera dissemblable : l'eau de mer, plus émissive, paraîtra plus chaude (émissivité de l'eau de mer : 0,98 ; de l'eau douce : 0,96 ; d'une eau polluée : 0,95). Les meilleurs conditions d'étude, selon le même auteur, seraient les suivantes

- la nuit, entre 20 h et 5 h du matin, I
- une altitude de vol comprise entre 1 300 et 2 000 m (permettant une largeur de zone analysée de 2,5 à 4 km),
- une période favorable du point de vue du débit des sources (des débits élevés fournissant en général les contrastes les plus forts).

(W) On notera toutefois qu'un tel mélange ne s'opère pas facilement en raison de "l'imperméabilité" relative de l'eau de mer vis à vis de l'eau douce ; ce mélange ne se produit qu'au prix d'un brassage vigoureux des eaux en présence.

Relevons toutefois qu'absence de contraste thermique ne signifie pas absence de sources sous-marines dans une région étudiée, le contraste pouvant être insuffisant, ou masqué par des effets parasites, pour pouvoir être décelé.

A cet égard, il est recommandé d'envisager la mise en oeuvre de la méthode d'une part en saison chaude, d'autre part en saison froide, pour pouvoir bénéficier de conditions climatiques extrêmes et espérer de meilleurs contrastes.

En outre, il est indispensable de procéder systématiquement au contrôle "in situ" des anomalies révélées - par échantillonnage pour analyses d'eau par exemple - pour être tout à fait sûr qu'elles se trouvent liées à des venues par sources sous- marines.

Remarque

Ce sont des procédés classiques qui doivent être mis en oeuvre pour la mesure des températures en profondeur, la technique infra-rouge ne S'appliquant qu'à la pellicule superficielle de l'eau de mer. On utilise en U.R.S.S. des colonnes supportant des thermistances à différents niveaux pour mesurer l'évolution des diverses températures de l'eau selon une verticale (165). Au Liban, la mesure directe en profondeur par sondes thermométriques a permis d'observer des anomalies jusqu'à 160 m au-dessous du niveau de la mer, anomalies qui seraient l'indice, selon GRUVEL (67) de sources sous-narines. De façon générale, les auteurs constatent que les sources sous-marines varient très peu de température ce qui corrobore les observations de régime et de minéralisation présentées au paragraphe 1.3.2.2.2.

2.1.1.4. Sismique réflexion

Cette méthode, encore peu utilisée (U.S.A., Sénégal), parait susceptible de fournir de bons résultats, notamment dans le cas de venues trop profondes pour provoquer des effets sensibles en surface, c'est-à-dire des anomalies. Elle est basée sur l'existence de discontinuités d'ordre physique entre des eaux de nature différente : ainsi la surface de discontinuité crée en mer entre eau douce et eau salée au voisinage d'une source, eaux de masses spécifiques différentes, est susceptible de constituer un plan de réflexion aux ultra-sons. Cette méthode serait effectuée en deux phases

- un dégrossissage par balayage continu selon une bande de 600 m de part et d'autre du bateau,

- un repérage précis dans les secteurs ayant fait apparaître de tels plans de réflexion ne correspondant pas au fond marin. (D'après informations orales communiquées par M. HORN, ingénieur géophysicien au B. R. G. M.).

2.1.2. Détection-des-conduits-karstigues

2.1.2.1. Apports de-la plongée souterraine

Les progrès accomplis depuis l'apparition de cette technique ont déjà permis, et permettront encore davantage dans l'avenir, de recueillir des données indispensables aux études et projets d'aménagements en domaine littoral, et de procéder même à des équipements et travaux en milieu immergé. De telles plongées, déjà réalisées en grand nombre sur divers sites de sources sous-marines - ainsi que sur des sources littorales - ont fourni la preuve que se retrouvaient, aujourd'hui enfouis sous le niveau de la mer, des réseaux karstiques analogues à ceux reconnus sur le continent et ont permis de préciser leurs caractéristiques diverses indispensables à prendre en compte dans les études en domaine littoral : morphologie des exutoires et des conduits, situation du réseau par rapport à son réservoir et au niveau de la mer, facteurs de localisation, nature et âge des remplissages, caractéristiques physiques et chimiques des écoulements etc...

Aussi convient-il de généraliser, ainsi qu'on le fait à terre, l'emploi de la plongée à l'occasion de toute étude : un certain nombre de sources sont en effet susceptibles de se révéler pénétrables, de telles pénétrations favorisant dans tous les cas aussi bien la connaissance du milieu karstique immergé que la recherche de solutions en vue de travaux d'aménagement, ainsi que cela a pu être fait à PortMiou (138). En particulier ont pu être mises au point sur le site de PORT-MIOU les techniques de la plongée et celles des mesures en milieu noyé (vitesse, charge hydraulique, température, conductivité), mesures qui se révèlent tout à fait indispensables à la conduite d'une étude dans un karst littoral.

2.1.2.2. Méthodes géophysiques seules possibles

Lorsqu'un réseau karstique n'est pas accessible à l'homme, ce qui est malheureusement encore souvent le cas, on sait que la difficulté de déterminer son tracé de façon indirecte à partir de la surface topographique, constitue le défaut majeur des études hydrogéologiques, et un obstacle souvent à la réalisation de travaux d'aménagement tels qu'on peut les mener à bien en d'autres types de réservoir.

Si les méthodes géophysiques peuvent apporter un certain nombre d'informations très importantes, telles les conditions aux limites d'un réservoir, c'est- à- dire sur sa géométrie et la nature des terrains qui l'encadrent, telles parfois le degré de fissuration ou d'altération de la roche ainsi que l'existence des principaux accidents tectoniques qui l'affectent, elles restent encore peu susceptibles de fournir des indications précises, sauf exceptions, en ce. qui concerne la localisation des conduits karstiques, et spécialement des conduits profonds: on ne peut que souhaiter qu'à la suite d'efforts nouveaux de recherche des progrès soient accomplis dans cette voie difficile

En domaine littoral, les méthodes électriques et électromagnétiques bénéficient toutefois d'un avantage particulier, lié à la contamination par l'eau de mer s celle- ci ayant une résistivité de 0,25 ohm.m, sa présence dans les calcaires abaisse leur résistivité, normalement comprise entre 250 et 600 ohm.m, à quelques ohm.m : ainsi peuvent être localisées facilement les zones d'invasion salée.

En ce qui concerne les conduits, signalons que les diverses méthodes électro-magnétiques mises en oeuvre à Port- Miou ont tout de même apporté des indications relativement précises sur la direction générale de la galerie immergée (cf. figure 29), direction qui a été confirmée à peu près par la suite par les résultats de nouvelles progressions obtenues par les plongeurs.

2.1.2.3. Méthodes géophysiques combinées avec la plongée

On citera ici une technique maintenant d'usage courant permettant de localiser avec grande précision, à partir de la surface topographique, un ou plusieurs points accessibles à l'homme dans un réseau karstique, que ces points soient au- dessus ou au- dessous de la surface de l'eau dans le conduit.

Seule une trop grande épaisseur de terrain pourrait restreindre l'emploi de la méthode, qui n'a été testée jusqu'à présent que sur des épaisseurs n'excédant pas une centaine de mètres.

On utilise la propriété d'une boucle horizontale alimentée par un courant alternatif - ou d'un barreau aimanté - de produire un champ magnétique dont la mesure en surface des composantes horizontales et verticales permet de déterminer la position (150-152). Ainsi, à Port- Miou, a - t- il été possible de situer avec exactitude un point situé à 500 m de l'exutoire en mer que les difficultés inhérentes à la plongée ne permettaient pas de situer avec assez de précision pour que puissent être entrepris les travaux d'aménagement souhaités en ce point (138).

2.1.3. Autres techniques d'études

Nous rappellerons ici, pour mémoire, des techniques largement en usage en milieu continental qui offrent un intérêt particulier en milieu littoral et sous- marin

- il s'agit d'une part des opérations de traçage dont on sait l'intérêt qu'elles présentent pour la démonstration de relations hydrauliques supposées ; indiquons toutefois que des échecs ont été constatés pouvant être dus soit aux conditions particulières d'écoulement dans un karst immergé, soit à l'emploi de traceurs ne convenant pas (en particulier il serait intéressant que des précisions soient apportées quant au choix des traceurs les mieux décelables en milieu salé) ;

- il s'agit d'autre part d'opérations de datation qui, dans le cas des sources sous- marines, pourraient apporter d'utiles données sur les temps de cheminement et sur l'origine de l'eau écoulée. En Floride, de telles informations ont été obtenues par des mesures de teneur en tritium et en carbone 14 (157), de même en Grèce par l'étude des rapports de concentration oxygène 16 et oxygène 18 (57) ;

- il s'agit enfin de l'ensemble des méthodes qui permettent de tenter d'évaluer les entrées d'eau dans un système aquifère afin d'en définir les ressources - donc les prélèvements possibles - et les caractéristiques d'écoulement : il est bien évident que les débits écoulés par un karst littoral doivent être connus avec une précision acceptable - ce qui est rarement possible de façon directe et continue - afin que puisse être apprécié l'intérêt économique du système étudié, intérêt qui peut être très inégal.

2.2. Techniques de captage

2.2.1. Essai d'inventaire des travaux existants

2.2.1.1. Sur des sources sous- marines

Pouvoir utiliser les sources sous- marines à des fins de consommation figure, depuis longtemps, parmi les préoccupations de l'homme. On rapporte ainsi que dès l'antiquité les habitants de la ville de Tyr pouvaient s'approvisionner en eau potable, issue d'une source sous-marine, en utilisant des récipients spéciaux transportés sur des barques jusqu'à l'emplacement de la source (94).

De nos jours, on connait l'utilisation faite des sources de Bahrain, dans le golfe Persique, pour l'alimentation en eau de régions de l'Arabie situées jusqu'à 400 km plus à l'Ouest : des vendeurs d'eau viennent la recueillir à l'emplacement de ces sources à l'aide d'outres en peau de chèvre remplies parfois par l'intermédiaire de tubes enfoncés dans les griffons (82). Dans le golfe de Carpentaria, situé dans la partie nord de l'Australie, c'est à l'aide de bambous que la population locale prélève l'eau de sources sous- marines (165).

Pourtant il faut bien constater, qu'en dehors de ces cas particuliers de prélèvement de type très rudimentaire - et dont on ne sait pas d'ailleurs s'ils peuvent être réalisés de façon permanente ... et selon quelles caractéristiques de volume et de qualité - que très rares paraissent être les captages de source sous- marine existant aujourd'hui dans le Monde Nous n'en avons relevé que trois dans la bibliographie consultée (encore conviendrait- il de vérifier nos informations sur ceux signalés en Italie) : l'un en Italie, à Trieste, à partir de la source sous- marine d'Aurisina située à 1 m sous le niveau de l'Adriatique (25) ; l'autre, lui aussi en Italie à La Spezia, à partir de la source sous-marine de Cadimare située à 6 m sous le niveau de la Méditerranée (25) ; le troisième en France, près d'Yport, à partir des sources littorales du même nom, situées sur l'estran et plus ou moins recouvertes par la Manche selon l'état de la marée (13) (cf. figure 35).

Quant aux autres travaux d'aménagements réalisés à ce jour sur des sources sous- marines, ou sur leur conduit d'arrivée, ils sont également très peu nombreux, et répondent à deux objectifs principaux

- ouvrages expérimentaux destinés à tester en vraie grandeur le comportement hydraulique du réservoir aquifère sous l'effet de l'ouvrage, tout en permettant la mise au point des techniques particulières à sa réalisation : tels sont les cas du barrage immergé de la galerie de Port- Miou (138) (cf. figure 39) et de la digue exécutée autour de la source littorale d'Ayos Yeoryios, près d'Argos dans le Péloponèse, digue de grande ampleur mais sur les caractéristiques de laquelle nous manquons encore:. de précisions (informations orales de M.ANDREADIS et de Melle COTSOVINOU, ingénieurs au ministère des Travaux publics à Athènes).

- dispositifs de prélèvement qui consistent à dériver, au moyen d'une conduite dont une extrémité est mise en place dans le griffon tandis que l'autre rejoint la surface de l'eau, une fraction de l'écoulement afin de pouvoir effectuer des mesures (charge, salinité, température)

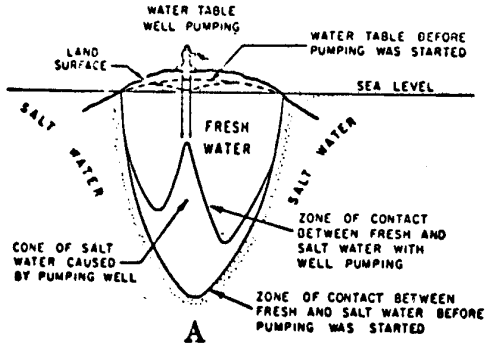


fig.30- Pompage en aquifère libre littoral.
d'après STRINGFIELD (158)

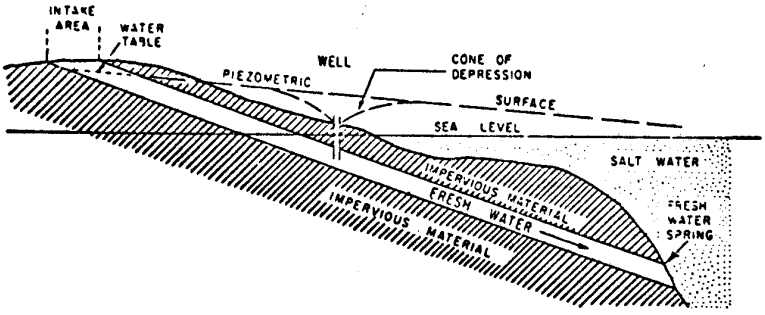


fig.31- Pompage en aquifère captif littoral.
d'après STRINGFIELD (158)

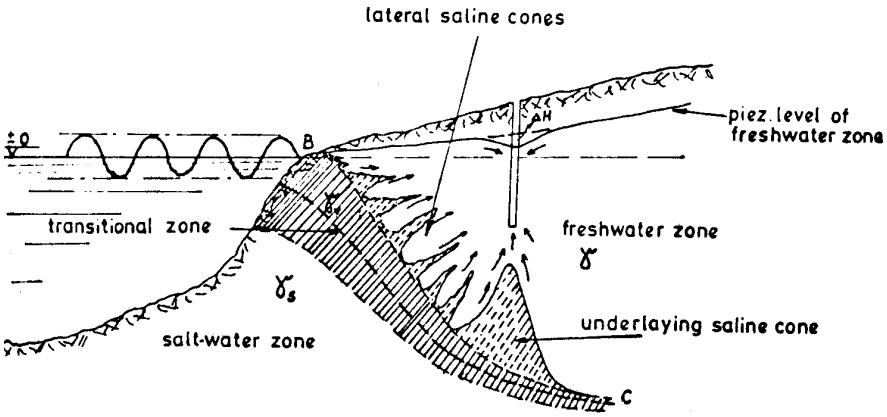


fig.32- Intrusion salée sous l'influence d'un pompage.
d'après MIJATOVIC (115)

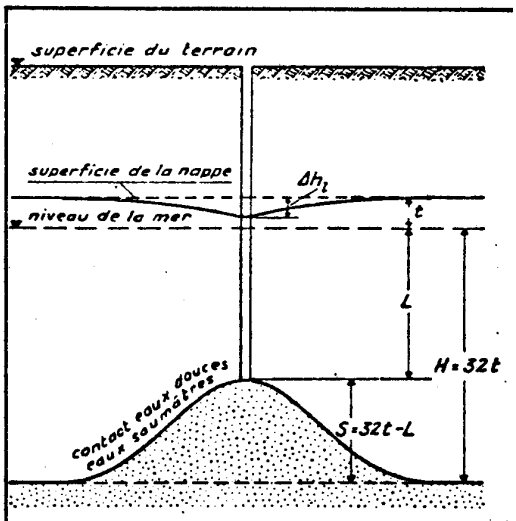
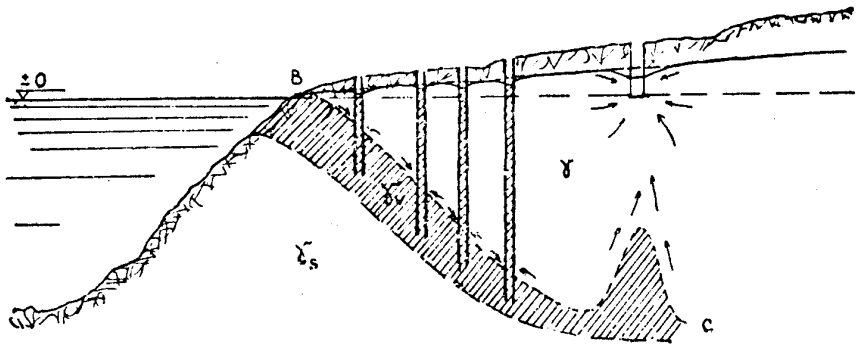


fig.34- Dépressions de sécurité pour un pompage
en aquifère contaminé.
d'après ZORZI (166)



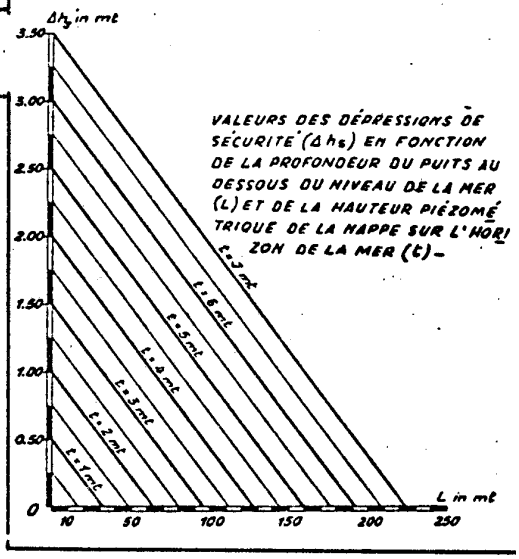


fig.33- Proposition de pompage en zone salée pour réduire la contamination.
d'après MIJATOVIC (115)

à des fréquences que l'on désire. De tels dispositifs ont été mis en place en France, sur la source sous- marine de la Vise (97) (cf. figure 7) sur la source de Citro-Citrello près du port de Tarento (155), en Italie le dispositif est renforcé par une pompe pour permettre d'obtenir des débits plus importants et être utilisé par la suite, le cas échéant, comme point de captage ; en Grèce, sur la source sous- marine d'Anavalos D'Astros (cf. figure 6), ce dernier n'ayant fonctionné que de juin à août 1962 (57) ; enfin sur diverses autres sources, mais pour de très courtes durées. La mise en place d'un tel dispositif est également envisagée sur la source sous-marine de la Mortola à la frontière franco-italienne (26).

2.2.1.2. Sur des sources continentales

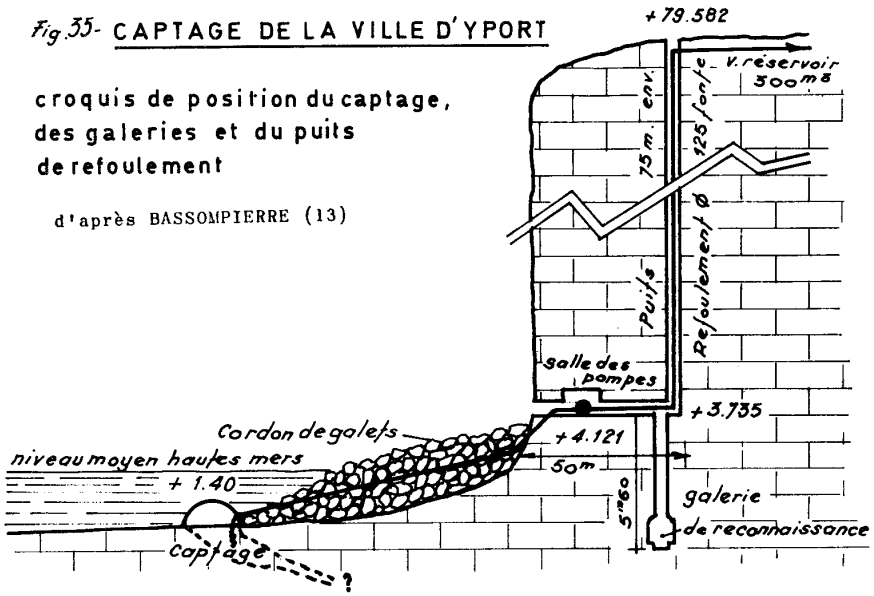
Les utilisations sont ici plus nombreuses et des vestiges sont parfois observés de travaux anciens de relèvement du niveau des exutoires, sans doute pour abaisser le taux de minéralisation, tels ceux que l'on observe sur la source d'Almyros, en Crête, et qui seraient l'oeuvre des Vénitiens (58).

En Yougoslavie, MIJATOVIC (118) indique que des essais de remontée du niveau de l'eau de la source de Pantan, près de Trogir, n'ont pas amené de diminution de la minéralisation. En France, GEZE (64) note qu'un relèvement de 50 centimètres de niveau de la source saumâtre de la Roubine de Vic eut pour effet de faire cesser son écoulement apparent. En Italie, c'est un serrement de la source de Chidro, pour régulariser son débit et faire abaisser l'interface eau douce-eau salée, que l'on envisage d'effectuer pour réduire sa minéralisation (141) (cf. figure 15).

A l'opposé de ces essais de relèvement, des pompages ont été réalisés qui ont entraîné le plus souvent des arrivées d'eau salée ainsi, en France, sur les sources de Cauvy des rabattements en-dessous du niveau marin ont entraîné d'abord des contaminations temporaires de courte durée, puis une contamination permanente du point de captage qui qui a dû être abandonné (131) ; au Liban, les pompages effectués sur une source de trop plein des sources sous-marines de Chekka, source temporaire pourtant située à plusieurs centaines de mètres du rivage, ont fait passer la minéralisation de l'eau, pompée à un fort débit (800 1/s) -quoique très inférieur au débit total des sources sous-marines (,0 environ 4 m3/s) - de 45 mg/1 à 3 000 mg/1 de C1- en 7 jours. (La source S1, d'un débit de 750 1/s, s'est alors arrêtée de couler et s'est mise à fonctionner en perte d'eau de mer : elle n'a repris son écoulement que trois mois après l'arrêt du pompage,(76) ; à l'opposé, en Yougoslavie, à Opacica, on a pu accroitre le débit de pompage d'une source temporaire, située à 1 km de la mer et à la cote +3, en la rabattant de 9 m, l'étude géologique ayant fait apparaitre que la contamination qu'on pouvait y redouter n'était pas à craindre en raison de l'isolement du réservoir par rapport à la mer (135).

2.2.1.3. En d'autres points du réservoir

I1 s'agit essentiellement ici des techniques diverses de foration, de très loin les plus employées jusqu'ici tant en milieu karstique que non karstique : forages, puits, galeries, exécutés séparément ou de façon combinée.



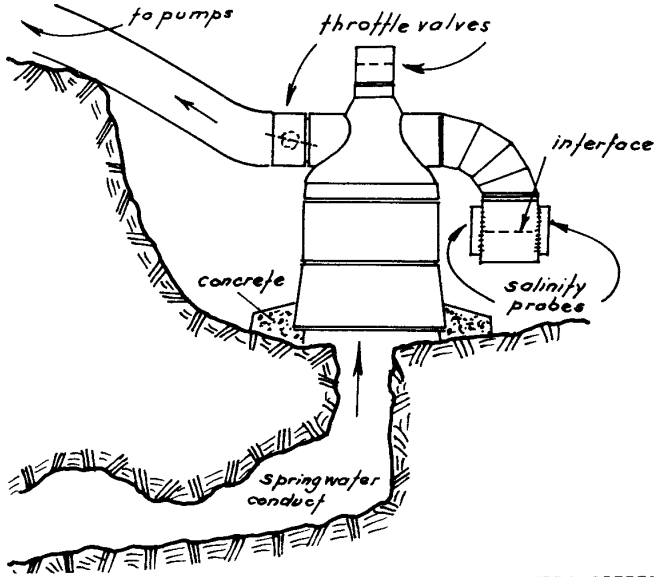


fig. 36 - Schéma du captage de la source sous-marine de CITRO-CITRELLO d'après STEFANON (155)

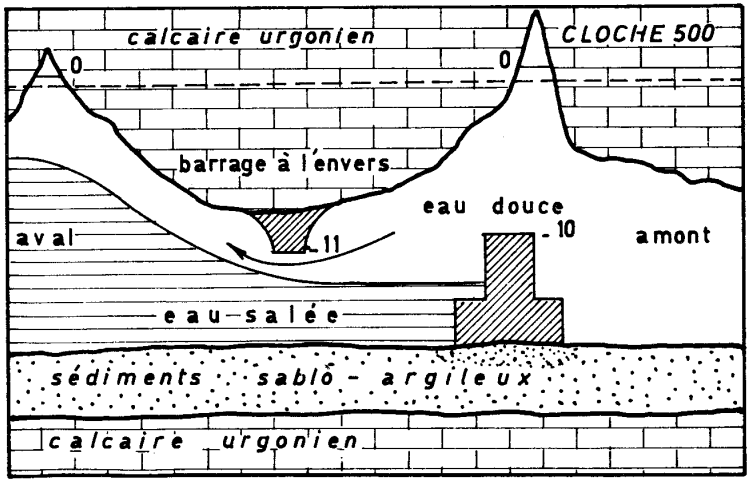


fig.37- Schéma du barrage "chicane" projeté dans la galerie de PORT-MIOU. d'après POTIE (138)

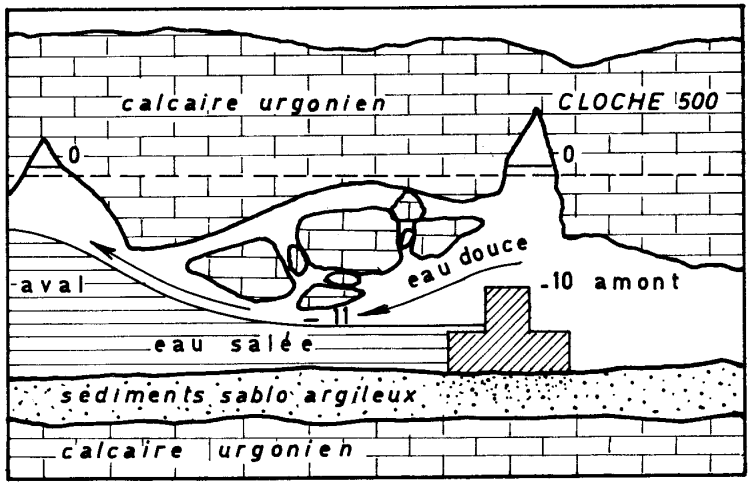


fig.38- Schéma de l'aménagement réalisé dans la galerie de PORT-MIOU. d'après POTIE (138)

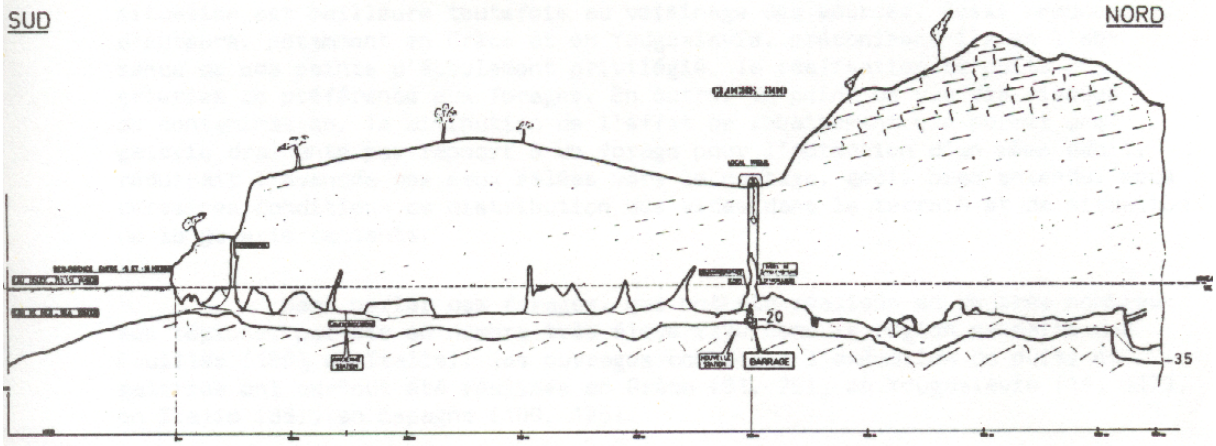


fig. 39.- Coupe schématique de la galerie sous-marine de PORT-MIOU (d'après POTIE).

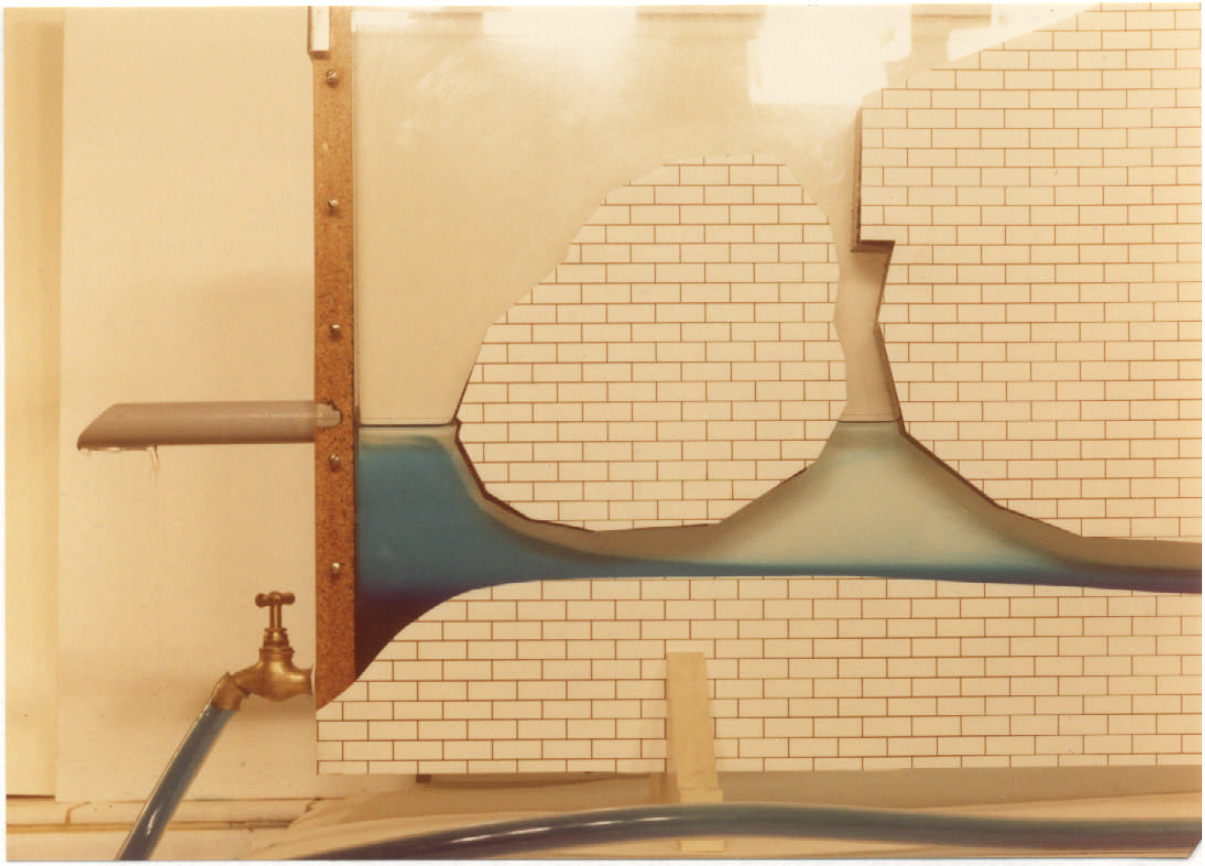


fig. 40.- Photographie du modèle réduit réalisé pour l'étude des relations eau douce-eau salée (ici colorée en bleu) dans la galerie sous-marine de PORT-MIOU (d'après RICOUR - Rapport inédit du Syndicat de recherches d'eau de PORT-MIOU - 71 SGN 411, Décembre 1971).

En domaine karstique leur implantation est, on le sait, souvent délicate si l'on a en vue de recouper le réseau de chenaux pour obtenir de gros débits, par manque d'indices sûrs de leur présence en profondeur ; la situation est meilleure toutefois au voisinage des sources. Aussi beaucoup d'auteurs, notamment en Grèce et en Yougoslavie, préconisent-ils en l'absence de ces points d'écoulement privilégié, la réalisation de puits et galeries de préférence aux forages. En outre, du point de vue des risques de contamination, la diminution de l'effet de rabattement que permet une galerie drainante par-rapport à un forage pour l'obtention d'un même débit, réduirait l'avancée des eaux salées vers le captage, ceci, bien entendu, sous certaines conditions de distribution des vides dans le terrain et de situation de la galerie captante.

Sans parler des forages, qui ont été réalisés en de très nombreuses régions, parfois en nombre très élevé (270 dans la région calcaire des Pouilles (166), en Italie), les ouvrages combinant l'exécution de puits et galeries ont surtout été réalisés en Grèce (31, 75), en Yougoslavie (11, 117), en Italie (38), en Espagne (100, 125).

Quelques observations faites à l'occasion de ces divers travaux, méritent d'être signalées

- En Italie plusieurs puits avec galerie de drainage existent dans la péninsule de Salento dans des zones de calcaires très fissurés et karstifiés contaminées en profondeur par l'eau de mer : à Trepuzzi un ouvrage de ce type permet de prélever 150 1/s avec 0,15 m de rabattement et 0,18 g/1 de ClNa, alors qu'à 30 m de là un forage donne 35 1/s avec un rabattement élevé et 0,35 g/1 de ClNa ; dans le Gargano un ouvrage analogue situé à 90 m en amont de la source saumâtre d'Irchio (2,19 g/1 de ClNa) exploite une eau à 0,21 g/1 de ClNa (38).

- En Yougoslavie, on a combiné l'exécution d'une galerie de captage qui n'avait donné à l'origine que de l'eau salée (1,5 g/1 de C1-) avec l'élévation du niveau d'une source saumâtre située plus en aval : la minéralisation dans la galerie s'est abaissée à 0,4 g/1 (90).

Toujours en Yougoslavie, BAKIK (12) cite un forage dans le calcaire donnant de l'eau contaminée contrairement à ce qu'aurait laissé prévoir la relation de GHYBEN-HERZBERG : le rabattement n'y était en effet que de quelques centimètres, pour un niveau initial à la cote +2,5, et l'on pensait disposer d'une cinquantaine de mètres d'eau douce.

- En Israël, ce sont des forages qui ont été exécutés dans le réservoir de la source côtière de Na'Aman, près d'Haifa, source contaminée par l'eau de mer (700 mg/1 de C1-) : ces forages exploitent 25 millions de m3/an d'eau non contaminée, et ont réduit le débit de la source de 18 millions de m3/an, la minéralisation de celle-ci s'étant élevée depuis l'exploitation (103).

Remarque .

Le processus de contamination sous l'influence de pompages est très généralement constaté à l'occasion de travaux miniers en réservoir littoral, car ils exigent souvent des rabattements importants, notablement en-dessous du niveau de la mer. Un tel cas a été observé i Z y a quelques années dans la région de Montpellier à l'occasion de pompages importants que nécessitait une exploitation de bauxite aujourd'hui abandonnée : un rabattement de plus de 1O m au-dessous du niveau de la mer dans le réservoir calcaire de la source sous

marine de la Vise entraînait une contamination rapide des eaux exhaurées et l'arrêt d'écoulement de la source ; peu après ta fin de l'exploitation, la source reprenait son écoulement habituel (18). Sur la côte ouest de la Sardaigne, une semblable contamination a été constatée à la suite de l'exploitation des mines d'Iglesias (Plomb-Zinc) environ le quart des eaux pompées â raison de 1 200 l/s serait de l'eau de mer (126). Aux U.S.A., bien qu'il ne s'agisse pas d'exhaure minier mais de captage, on a observé aussi bien en Californie qu'en Floride, une diminution du débit des sources sous- marines sous l'influence des pompages (82) .

Les figures 30, 31, 32 et 34 données en page 35, illustrent bien les risques de contamination d'un captage sous l'effet du rabattement, risques découlant de ce que nous avons déjà exposé au paragraphe 1.3.1. quant à la nature des relations eau douce- eau salée dans un réservoir aquifère.

On notera que dans le cas d'un aquifère captif (au moins partiellement) en- dessous du niveau de la mer (cf. figure 31), des conditions meilleures d'exploitation peuvent être rencontrées découlant des contraintes imposées à l'écoulement de l'eau et à .l'invasion de la mer , ainsi des forages effectués en mer au large des côtes de Floride ont donné lieu à des venues artésiennes, l'une à 43 km du rivage à 0,7 g/l de Cl-, l'autre à 100 km du rivage à 2 g/1 de Cl- (82).

On soulignera enfin que les recommandations de ZORZI quant aux limites de rabattement à ne pas dépasser en nappe libre pour être à l'abri d'une contamination (cf. figure 34) reposent sur des considérations théoriques qui, certes ont été vérifiées dans certains cas et notamment dans des milieux homogènes et isotropes, mais qui ne paraissent, en domaine karstique, que devoir être maniées avec une extrême prudence.

2.2.2. Solutions préconisées

Une certaine diversité d'opinions se manifeste chez les auteurs, sans doute liée aux conditions hydrogéologiques locales des problèmes de captage qu'ils ont eu à étudier, conditions dont on sait maintenant qu'elles peuvent être très diverses en réservoir aquifère calcaire. Ainsi, pour BURDON (57), il. faut chercher à récupérer l'eau douce avant sa zone de contamination ; pour COTECCHIA (38), la construction de barrages sur des sources est â déconseiller en raison des contournements de l'eau ; pour MIJATOVIC (115) il faut pomper dans la partie contaminée du réservoir pour diminuer la charge de l'eau salée par rapport à celle de l'eau douce dans la partie plus en amont où on exploite celle-ci (cf. figure 33).

Notre propre expérience nous conduirait à penser qu'il convient de préconiser telle solution plutôt que telle autre, mais nous nous devons de tenir compte ici des expériences de tous et d'essayer de mettre.en lumière les diverses possibilités et recommandations que l'on peut retirer de la bibliographie consultée quant à la conduite de travaux de captage.

Indiquons tout d'abord, et cela va de soi, que le choix d'un mode de captage devra être subordonné aux enseignements de l'examen de l'ensemble des données recueillies au cours des études préalables nécessaires.

Indiquons ensuite que si le choix du type d'ouvrage résulte des conditions d'écoulement dans le réservoir étudié, et par contre-coup des risques de contamination par le sel, il devra également tenir compte des actions mécaniques et chimiques de l'eau de mer qui pourraient affecter notamment en milieu sous-marin, la qualité de l'ouvrage et sa durée de vie.

Au total, les diverses possibilités qui sont offertes et qui représentent en fait les diverses tendances des auteurs, peuvent être regroupées de la façon suivante selon que l'on réalise ou non des aménagements spéciaux en dehors des puits, galeries et forages

2.2.2.1. Sans aménagements spéciaux

Se placent dans cette catégorie tous les captages réalisés par pompage ou dérivation simple d'un écoulement, tels qu'ils ont été réalisés le plus souvent soit à partir de sources, soit à partir de forages, puits ou galeries. I1 s'agit dans le cas de pompages de fixer la part d'eau douce qui peut être prélevée dans l'aquifère au point de captage, selon sa situation, sans risquer une contamination de ce dernier. Nous avons vu qu'une telle contamination pouvait se produire dans certains cas malgré les précautions et recommandations des auteurs. L'ensemble de ces procédés sont pourtant encore souvent les seuls utilisés en réservoirs littoraux, bien qu'ayant l'inconvénient de ne permettre d'exploiter qu'une fraction de la ressource en eau douce puisqu'il est nécessaire de maintenir un équilibre. A cet égard des améliorations pourraient être apportées pour accroître les volumes d'eau douce utilisables : soit en réalisant des pompages en zone salée comme le préconise MIJATOVIC (115)x, soit en surexploitant de l'eau douce en période d'alimentation et en la stockant en réservoir de surface (58), - les deux méthodes pouvant être combinées -, soit enfin en assurant une recharge artificielle d'eau douce pouvant être conduite ou bien en différents points du réservoir, ou bien dans sa partie aval dans le but d'y créer un barrage hydraulique (95), les terrains calcaires se prêtent parfaitement bien à ce type d'opérations ; ces méthodes se rejoignent en fait puisqu'elles tendent à régulariser le régime de l'eau douce dans le réservoir.

2.2.2.2. Avec aménagements spéciaux

Se placent dans cette catégorie toutes les interventions visant à introduire une discontinuité dans un réservoir provoquant des modifications des conditions naturelles d'écoulement. Ces discontinuités peuvent être rangées en deux catégories principales

---

* L'expérience faite en France dans la vallée du PRECONIL près de Ste Maxime n'a pas abouti aux résultats que laissait espérer l'application de cette méthode qui reste encore théorique (d'après L. POTIÉ).

** N.B : Un moyen original de captage pouvant entrer dans la catégorie des aménagements spéciaux, est signalé dans l'ouvrage "L'eau dans le monde" (collection Larousse-Paris 1970, pp. 184-185 avec schéma) : il consisterait à entourer une zone d'émergence d'eau douce issue d'une source sous- marine ascendante d'un rideau flottant, créant donc une discontinuité non dans le réservoir mais dans le milieu marin ; l'eau douce ainsi isolée de la mer pourrait être pompée du rivage. L'emploi d'un tel dispositif, qui n'a encore jamais été réalisé à notre connaissance, pourrait également être envisagé pour le jaugeage de sources sous- marines ascendantes.

2.2.2.2.1. Discontinuités destinées à isoler la zone d'eau douce d'un réservoir dé sa zone de contamination

On utilise ici des écrans (barrages, voiles d'injection, rideau de palplanches, etc...) arrêtant directement une arrivée d'eau salée. Par exemple, sur la figure 13 donnée en page 16, la fermeture totale du conduit de la source inférieure doit entraîner (s'il n'y a pas d'autre cause de contamination) un écoulement permanent en eau douce à la source supérieure. Un tel blocage de la contamination directe par l'aval du conduit a été ainsi obtenu à Port- Miou par barrage partiel de la galerie (cf. figure 38 et 39) (139).

A Morinj, en Yougoslavie, PAVLIN (135) préconise un voile d'étanchéité de 400 m sur 100 m pour isoler une source, ' que l'on projette de surexploiter par pompage, des influences redoutées d'une arrivée de sel par une zone susceptible de lui servir de transit. L'opération de barrage hydraulique citée au paragraphe précédent peut également être mentionnée ici.

2.2.2.2.2. Discontinuités destinées à mettre en charge l'eau douce d'un réservoir pour réduire ou supprimer la contamination

On utilise ici l'effet dynamique d'une mise en charge provoquée par un barrage, un relèvement de seuil, ou un diaphragme pour modifier les échanges eau douce-eau salée dans le réservoir. La difficulté est ici en dehors du risque de fuite déjà signalé, et le cas échéant de débourrage, d'apprécier la hauteur nécessaire à la surélévation provoquée pour avoir l'assurance d'avoir de l'eau douce, tout en ayant en même temps un débit de surverse intéressant. On espère beaucoup d'enseignements à cet égard à la suite des résultats des divers travaux en cours ou en projet, notamment sur les sources du Chidro (141), d'Almyros (58), d'Ayos Yeoryios (57), et sur la galerie de Port-Miou (138).

De telles mises en charge pourraient également, dans certains cas et sous certaines conditions de fermeture, contraindre les eaux à utiliser un orifice de trop plein davantage à l'abri des risques de contamination marine : tel pourrait être le cas dans le réseau de la source sous- marine de la Vise sous l'effet de la fermeture, envisagée, de son orifice de sortie.

Indiquons enfin que les travaux du barrage immergé exécuté dans la galerie de Port- Miou ont permis la mise au point de techniques et matériaux spéciaux parfaitement bien adaptés aux conditions particulières du milieu karstique sous- marin.

Remarque : Les travaux de barrage de la galerie de PORT-MIOU - travaux examinés dans le détail dans le tiré à part donné en annexe au présent rapport ("Etudes et captage de résurgences d'eau douce sous-marines", par L. POTIÉ et J.RICOUR) - ont été prévus en deux phases

- la première a été exécutée en 1972 et répond au premier objectif examiné dans cette page (paragraphe 2.2.2.2.1.) ;
- la deuxième, dont on espère l'exécution prochaine, consistera à obturer plus ou moins complètement la galerie pour réaliser une mise en charge susceptible de satisfaire au deuxième objectif examiné dans cette page (paragraphe 2.2.2.2.2).

3. INTÉRÊT ÉCONOMIQUE

L'intérêt des sources littorales et sous-marines, et plus généralement celui des ressources en eau douce de leur réservoir aquifère, doit naturellement être examiné sous l'angle économique : en effet, parcequ'elles offrent, ainsi que nous l'avons vu, des perspectives d'exploitation - exploitation dont certains réservoirs littoraux sont du reste déjà l'objet - elles doivent être prises en considération dans les projets d'aménagement hydraulique d'une région(*).

Il importera donc de chercher à évaluer l'importance des divers facteurs qui vont intervenir dans l'appréciation de l'intérêt économique des ressources en eau littorales : ces facteurs permettront de déterminer le coût de l'ensemble des opérations nécessaires à la mise en exploitation et, par la même, d'apprécier la compétitivité de leur captage éventuel vis-à-vis des autres solutions qui peuvent être offertes, compte tenu de l'importance des besoins à satisfaire, dans la région considérée.

Trois paramètres paraissent ici devoir être pris en compte l'importance de la ressource exploitable, celle du coût de l'exploitation, celle des besoins à satisfaire.

3. 1. Évaluation de ta éLu4ouice

Il s'agit de déterminer l'importance de la ressource en eau douce exploitable en toute sécurité, c'est-à-dire sans risque de contamination. Cette ressource peut être évaluée soit de façon globale pour l'ensemble du réservoir aquifère, soit de façon ponctuelle, exprimée alors par la productivité d'un ouvrage captant, le nombre de ces ouvrages restant fonction -sous certaines conditions - de l'importance de la ressource globale. I1 est bien entendu que peuvent ici être prises en considération les possibilités ou non de régularisation du régime de l'eau, possibilités examinées au paragraphe *2.2.2.*

Ce paramètre s'exprime par le produit d'un volume (la quantité d'eau prélevable) par un temps (la durée de prélèvement).

Les diverses méthodes d'évaluation utilisées par les auteurs ne sont pas spécifiques des Karsts littoraux ; ce sont des méthodes courantes en hydrogéologie : bilans hydrologiques partiels, équation de DARCY (valable en milieu homogène et isotrope), débits spécifiques, débits unitaires, méthodes analogiques, etc...

---

* N.B. : Nous, n'envisageons ici que le seul aspect de l'exploitation à des fins de consommation d'eau douce. Mais l'utilisation des sources littorales et sous- marines - et le cas échéant de leurs chenaux d'écoulement - pourrait également être envisagée à d'autres fins refroidissement, fourniture d'énergie, alimentation de plans d'eau à l'intérieur des terres, rejets en mer, etc...

Plusieurs chiffres peuvent donner une idée de l'importance de la ressource globale évaluée par les auteurs : pour NICE, cité par ZEKTER (165), les quantités d'eau douce souterraine perdues directement dans la mer seraient de 7 000 m3/s au total dans le monde (cet auteur les avait évaluées une première fois à 50 000 m3/s). En U.R.S.S., de telles pertes seraient comprises entre 10 et 1 500 m3/s pour la mer Caspienne et entre 30 et 126 m 3/s dans la mer d'Aral (165).

En Italie, COTECCHIA (39) estime à 14 m3/s le débit perdu dans la mer dans la péninsule de Gargano, et à 20 m3/s celui perdu dans l'Adriatique sur le littoral des Pouilles ; l'importance de ces pertes se trouve confirmée par une teneur en sel anormalement basse de l'eau de mer le long de cette côte : 8 à 10 g/1 de C1- contre 21,5 g/1 plus au large (38). En Sicile, on estime qu'environ 30 m3/s restent chaque année inutilisés, la plus grande partie allant se perdre en mer par les aquifères littoraux (28). En Grèce, plus de 60 m3/s seraient ainsi perdus par les sources littorales et sous- marines (134).

En ce qui concerne la France, les études en cours sur divers réservoirs aquifères littoraux devraient bientôt permettre de connaître avec une précision acceptable l'importance de ce phénomène. Une première approche d'une estimation quantitative peut toutefois être tentée pour les seules régions karstiques du littoral méditerranéen français par l'évaluation du débit moyen inter-annuel d'écoulement par unité de surface, selon la méthode utilisée par 0. DELAROZIERE-BOUILLIN (*). Ainsi en considérant les surfaces respectives des diverses unités calcaires littorales telles qu'elles apparaissent sur la figure 5, et pour des modules inter-annuels d'écoulement compris entre 5 et 10 l/S/KM2 (intervalle rendant compte des diverses valeurs calculées pour ce paramètre pour les réservoirs aquifères karstifiés de la région méditerranéenne) le débit moyen inter-annuel restitué par les unités considérées serait au minimum de l'ordre de

- 2 m3/s pour la partie orientale des monts de Corbières (430 km²)
- 0,35 m3/s pour le massif de la Clape (70 km²)
- 0,32 m3/s pour le massif de la Gardiole (65 km²)
- 0,95 m3/s pour le causse d'Aumelas (190 km²)
- 0,60 m3/s pour la chaîne de la Fare (120 km²)
- 0,90 m3/s pour la partie occidentale des chaînes de l'Estaque et de l'Étoile (180 km²)
- 0,75 m3/s pour la partie occidentale de l'auréole externe du massif du Beausset(150 km²)
- 1 m3/s pour la partie centrale du massif du Beausset (200 km²)
- 0,12 m3/s pour le bassin de Bandol (25 km²)
- 0,35 m3/s pour le massif de Valbonne (70 km²)
- 0,75 m3/s pour l'arc de Nice (150 km²)

soit un total pour l'ensemble des karsts de la côte méditerranéenne française d'environ 8 m³/s (**).

---

* Voir en particulier de cet auteur : "Carte du débit moyen des nappes d'eau souterraine de la France" - DATAR - 1970 ; et "Contribution à l'étude des circulations karstiques par la méthode des bilans hydrologiques partiels" - BRGM - rapport inédit 69 SGL 123 HYD.

** N.B. Cette évaluation ne prend pas en compte la valeur du drainage éventuel par le karst d'écoulements de surface ou d'aquifères juxtaposés non calcaires.

Ces chiffres doivent bien entendu être maniés avec prudence d'une part parce qu'ils résultent d'évaluations qui doivent être précisées cas par cas selon les conditions hydrogéologiques, hydrologiques et climatiques propres à chaque unité, d'autre part parce qu'ils ne représentant pas la ressource réellement exploitable : ils permettent malgré tout de se faire une première idée de l'importance des diverses unités, dont les valeurs des écoulements théoriques respectifs pourront ainsi être progressivement réajustées en fonction des débits qui sont ou qui seront effectivement mesurés sur leurs exutoires.

3. 2. Evaluation du coût de V exploitation

Le coût de l'exploitation d'un réservoir aquifère est l'addition des coûts respectifs que représentent les études préalables nécessaires, l'exécution des travaux proprement dits -travaux de reconnaissance et travaux de captage, traditionnels ou spéciaux - et le fonctionnement de l'exploitation selon le débit prélevé, la puissance installée, le coût de l'énergie, etc...

I1 est exprimé dans l'unité monétaire du pays considéré.

Peu d'informations peuvent être données, en l'état actuel de la documentation consultée, dans le domaine des sources littorales et sous- marines, d'une part parce que les travaux réalisés à ce jour sont très peu nombreux, d'autre part parce qu'ils n'ont pas encore souvent dépassé un stade expérimental, les frais de recherche occasionnés dans ces cas là ne pouvant être assimilés aux frais normaux qu'entraînerait la mise en oeuvre de techniques plus opérationnelles.

Indiquons toutefois qu'une estimation du montant des travaux prévus pour la construction de l'ouvrage de relèvement du seuil de la source d'Almyros, en Crête, a été faite par la F.A.O. (58) le coût total devant être de l'ordre de 10 millions de drachmes (1972).

Le coût d'un ouvrage du type de celui réalisé dans la galerie immergée de Port- Miou (ouvrage léger réalisé en coulis d'argile, ciment et adjuvant) est estimé, en prix de construction, de 200 à 500 francs par m de coulis (*) (1 500 m3 ont été utilisés à Port- Miou) ; selon les débits possibles de prélèvement, on estime à moins de 5 centimes par m3 l'incidence de tels travaux spéciaux sur le coût de l'eau (de 1 à 5 centimes.

Une enquête plus approfondie sur les divers sites où paraissent s'offrir des possibilités d'exploitation devrait être menée à bien pour préciser leur intérêt économique.

---

* d'après "Perspectives pour l'aménagement littoral français - Rapport au Gouvernement -Novembre 1973". La Documentation française - Paris 1974, pp. 168-170).

3. 3. Evaluation des besoins (*))

La situation géographique des réservoirs des sources littorales et sous-marines si elle constitue souvent un facteur contraignant du point de vue de la qualité en raison des risques de contamination de l'eau douce par l'eau de mer, leur fait bénéficier par contre d'un intérêt nouveau qui est la conséquence de l'accroissement récent et considérable des besoins en eau dans les régions côtières où se développent toujours davantage l'habitat, l'industrialisation et le tourisme.

A titre d'exemple, nous donnons dans le tableau de la page 46, les prévisions pour les horizons 1985 et 2000, des besoins en eau des régions méditerranéennes françaises. Ces données ont été recueillies par la Société des eaux de Marseille auprès de divers organismes (Directions régionales et départementales de l'agriculture et de l'équipement, Agence financière de bassin Rhône-Méditerranée-Corse, O.D.E.A.M.).

L'importance de ces besoins découle du développement attendu des quatre secteurs suivants

- Démographie

De ce point de vue, les régions méditerranéennes se placent parmi les plus dynamiques de France : d'après des estimations de la D.A.T.A.R., leur population pourrait doubler en 30 ou 40 ans.

On serait ainsi conduit à une population de l'ordre de 8 à 10 millions sur la façade méditerranéenne (contre 5 en 1970).

- Industrie

Actuellement, l'implantation la plus forte se situe dans la région marseillaise avec l'aménagement de Fos où 7 000 ha doivent être équipés.

Des projets d'aménagement de grandes zones industrielles se font jour également dans les régions de Sète, de Béziers-Narbonne et même de Nice.

- Agriculture

Etant donné la croissance démographique et industrielle, l'agriculture devrait subir également un développement rapide.

Ce développement, joint à la mise en oeuvre de plus en plus poussée de grands équipements collectifs et de moyens scientifiques en vue d'augmenter la production, amène à prévoir une augmentation très rapide des quantités d'eau nécessaires : en 30 ans, elles seraient multipliées par un facteur compris entre 5 et 10.

Par ailleurs, des prévisions vraisemblables à plus long terme donnent pour l'ensemble de la zone méditerranéenne (Provence-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon et Corse) un supplément de l'ordre de 400 000 ha irrigués (soit un total de 700 000 ha). Ces irrigations supplémentaires concerneraient surtout la région Languedoc-Roussillon.

- Loisirs et tourisme

La région méditerranéenne jouit, de ce point de vue, d'une position privilégiée. L'effort d'équipement touristique y est très important, notamment dans la zone côtière du Languedoc-Roussillon. Le nombre de lits est actuellement de l'ordre du million sur l'ensemble de la côte méditerranéenne; des prévisions (peut- être un peu optimistes)

(*)Enquête effectuée par Madame ANGELVIN (S.E.M.) que nous tenons à remercier ici.

PREVISIONS DES BESOINS EN EAU DANS LES REGIONS MEDITERRANEENNES FRANCAISES

(d'après enquête de la Société des eaux de Marseille)

Chiffres indiqués en l/s

	BESOINS EN 1985				BESOINS EN 2000			
	Population	Agriculture	Industrie	Total	Population	Agriculture	Industrie	Total
Alpes Maritimes								
. Zone de Nice	3 700	1 800	-	5 500	6 000	2 000	-	8 000
. Zone est : Menton	700	120	-	820	1 200	120	-	1 320
. Zone ouest : Cannes	3 000	700	-	3 700	6 000	700	-	6 700
Aude (estimation pour 1995)								
. Population sédentaire	-	-	-	-	540	-	-	540
. Population estivale	-	-	-	-	1 100	-	-	1 100
Bouches-du-Rhône								
. Zone sud-est } Aire	9 600	4 600	2 000	16 200	14 600	4 600	2 500	21 700
. Zone nord-est } marseillaise	2 200	7 500	1 600	11 300	3 900	7 500	2 800	14 200
. Zone ouest }	2 500	35 500	16 800	54 800	4 600	35 500	40 000	80 100
. Zone est du département	-	600	-	600	-	600	-	600
. Zone Durance	-	9 100	-	9 100	-	9 100	-	9 100
. Zone Comtat-Alpilles	900	34 200	1 400	36 500	1 400	34 200	1 600	37 200
. Zone Camargue	-	39 000	-	39 000	-	39 000	-	39 000
Gard								
Portion littorale du département								
. Population sédentaire	230	-	-	230	-	-	-	-
. Population estivale	450	-	-	450	-	-	-	-
Hérault	3 600	-	-	3 600	4 000	-	-	4 000
Pyrénées Orientales (bande littorale)								
. Population sédentaire	1 800	-	-	1 800	-	-	-	-
. Population estivale	4 700	-	-	4 700	-	-	-	-
Var (bande littorale)	3 200	-	-	3 200	-	-	-	-
Totaux	36580	133 120	21 800	191500	43 340	133 320	46 900	223 560

Observations : - La colonne "Agriculture" englobe également arrosage municipal et consommation d'eau pour loisirs.
- Pour les Alpes Maritimes l'O.D.E.A.M. indique que les chiffres cités n'ont pas encore "valeur officielle".

prévoient un quadruplement d'ici à l'an 2000, sans parler de l'accroissement sans doute aussi important des terrains de camping.

Parallèlement, on assiste en zone côtière à la multiplication des ports de plaisance.

Ainsi peut-on escompter, d'ici 30 à 40 ans, un apport de population saisonnière (surtout en été) de l'ordre de 3 à 5 millions d'habitants.

La satisfaction de l'ensemble de ces besoins pose ainsi des problèmes à plus ou moins longue échéance et va donc exiger 1a prise en considération des diverses solutions possibles selon les zones du littoral concernées (*). A cet égard les ressources susceptibles d'être offertes par les réservoirs aquifères littoraux, et spécialement par les réservoirs aquifères calcaires, ne peuvent pas être négligées même si elles n'apparaissent pas à elles seules capables de satisfaire ces besoins. Leur importance variable selon les secteurs du littoral, peut très bien, pour certaines d'entre elles tout au moins, justifier un effort supplémentaire de recherche et d'expérimentation et leur permettre de jouer dans certains cas un rôle non négligeable dans les aménagements projetés.

() Parmi ces solutions, le dessalement de l'eau de mer reste encore peu compétitif en raison du coût actuel, de l'ordre de 1 franc à 9,5 francs. par m3 pour des installations de grande capacité (au- delà de 10 000 m3/jour). A ce propos on pourrait également envisager le traitement des eaux de sources littorales et sous- marines dans la mesure où leur faible minéralisation, autoriserait, sous certaines conditions de régime, une économie par rapport au dessalement de l'eau de mer.

CONCLUSION

Au terme de l'étude documentaire que nous avons effectuée sur les sources littorales et sous-marines et sur leurs réservoirs aquifères, il apparait qu'un grand nombre d'informations ont été recueillies dans des domaines très variés : elles intéressent en effet à la fois les nombreux pays où de telles sources ont été signalées, les diverses méthodes qui ont été employées pour leur étude, les différents types d'aménagements envisagés ou déjà réalisés qu'elles ont suscité ainsi que leurs résultats, les perspectives enfin de leur utilisation plus généralisée dans l'avenir. Ces informations paraissent donc bien correspondre aux objectifs fixés par le contrat.

I1 convient maintenant, compte tenu de l'intérêt économique que représenterait la récupération au moins partielle de ces ressources dont la plupart sont actuellement perdues sans profit, compte tenu aussi de l'état d'avancement des connaissances et des techniques d'intervention, et sans négliger pour autant les difficultés inhérentes aux conditions hydrogéologiques très diverses que peuvent présenter les réservoirs calcaires, de chercher à accomplir un nouvel effort pour acquérir la maîtrise nécessaire à la conduite, et au succès, des divers travaux d'aménagements qui peuvent y être envisagés.

Nous avons déjà indiqué, qu'il nous paraissait opportun de poursuivre la collecte d'informations sur le sujet : ces informations devraient être recueillies aussi bien par l'étude bibliographique - car toutes les publications notées n'ont pas pu être consultées -que par des enquêtes plus approfondies à conduire sur les quelques sites ayant fait l'objet d'aménagement, et auprès des organismes responsables de leur exécution.

Mais il nous parait également nécessaire que puissent être poursuivies les études en cours sur le site de PORT-MIOU en même temps que soient envisagées de nouvelles **expérimentations sur des sites paraissant** offrir des conditions différentes et un intérêt économique appréciable.

I1 en est ainsi de deux sites en région méditerranéenne française, sites pour lesquels de nombreuses observations ont déjà été faites ou sont encore en cours. I1 s'agit de la source sous-marine de la Vise, dans l'étang de Thau, au voisinage du port de Sète, et de la source littorale de Font Estramar, en bordure de l'étang de Leucate, au voisinage de la ville de Perpignan : dans le premier cas il conviendrait de réaliser une obturation du griffon sous-marin pour contraindre les eaux à utiliser un trop plein continental à l'abri des risques de contamination ; dans le deuxième cas il conviendrait d'examiner l'effet sur la minéralisation de l'eau, soit d'un serrement du conduit d'arrivée de l'eau de la source, soit d'un relèvement de son seuil de déversement : l'une ou l'autre de ces méthodes, combinée à des travaux de colmatage d'orifices secondaires, pourrait entraîner un abaissement relativement faible de la contamination actuellement constatée en étiage mais suffisant pour permettre l'usage de son eau de façon permanente.

Les deux opérations ici préconisées constitueraient à la fois le complément souhaitable à la mise au point des diverses techniques possibles de captage - mise au point déjà largement entamée de façon très satisfaisante et qu'il convient de poursuivre en priorité sur le site de PORT-MIOU tout en offrant une possibilité sérieuse de favoriser à court terme la solution au difficile problème de l'alimentation de ces deux régions en plein expansion. Ici, sans doute plus qu'ailleurs où les besoins de nouveaux captages se font peut- être moins sentir, de tels travaux devraient soutenir la comparaison économique avec les autres solutions qui pourraient y être envisagées.

Mais tôt ou tard, selon les différents pays du monde où existent de telles sources, il sera dans le destin de l'homme, ne pouvant pas négliger leurs ressources aujourd'hui perdues, de devoir franchir une nouvelle étape pour tenter leur mise en valeur.

Marseille- Orléans, le 24 juillet 1974

BIBLIOGRAPHIE DES TRAVAUX CONSULTES

(1) ALFIREVIC S. (1961) .- Bases géologiques-tectoniques des sources sous- 6
marines en Adriatique .- *Commission internation. Explor. Mer Méditerr., Rapp. P. V., t. 16, n° 3, p. 745-748.*

`(2) ALFIREVIC S. (1966) .- Hydrogeological investigations of submarine springs in the Adriatia .- *Mémoires A. I. H.,* vol. *VI., Réunion de Belgrade 1963, p. 255-264.*

(3) ALFIREVIC S. (1966) .- Les sources sous-marines de la baie de Kastela.

Morphologie, structure hydrogéologique, conditions hydrogéo logiques, relations géotechniques .- *Acta adriat.. Yougosl., t. 10, n° 12, p. 3-38.*

(4) ARCHAMBAULT J. (1965) .- Remarques concernant la chronique d'hydrogéologie n° 7 .- *Chronique d'hydrogéologie, n° 8, décembre 1965, p. 99 -104.*

(5)ARCHAMBAULT J., BOURGUET L., VAILLEUX Y. (1971) .- Les lois de l'hydrau lique des milieux poreux sont-elles applicables aux aquifères calcaires karstifiés ? . - Actes *coll. hydro. pays calcaires, Besançon, p. 255-264.*

(6) ARMANGAU C., AVIAS J. (1971) .- Note préliminaire sur l'étude de l'hydro-dynamique, de la salinité, de la température et de la pollution des eaux des étangs côtiers du Languedoc-Roussillon par télédétection au moyen de mesures infrarouges .- *C. R. Acad. Sci., Paris, t. 273 (22 novembre 1971), série D, p. 1910-1913.*

(7) ARONIS G. (1963) .- A special case of karst hydrology .- *Mémoires A.I.H., vol. IV, Réunion de Rome 1961, p. 61-63.*

(8) ARONIS G. (1964) .- Observations on the coastal karst of Greece .- Mémoi*res A.I.H., t. V, Réunion d'Athènes 1962, p. 256-265.*

(9) ASTIER J.L. (1971) .- Géophysique appliquée à l'hydrogéologie. Chapitre V "La recherche en pays karstique", p. 180-191 .- *Ed. Masson Paris.*

(10) AUDOUIN J. (1960) .- Hydrologie de l'étang de Thau. Thèse Montpellier. Chapitre III "La Bise", p. 55-57 in *Revue des travaux del'Institut des pêches maritimes.*

(11) BAKIC M. (1964) .- On methodology of research and study for underground waters for the requirements of water supply in the littoral Karst area of Yugoslavia .- *Mémoires A.I.H., t. V, Réunion d'Athènes 1962, p. 334-343.*

(12) BAKIC M. (1966) .- Hydrogeological importance of results of prospecting for water on the isle of Brac .- *Mémoires A.I.H., vol. VI, Réunion de Belgrade 1963, p. 299-307.*

(13) BASSOMPIERRE P., ROUX J.C. (1968) .- Etude hydrogéologique des Fontaines d'Yport (Seine-Maritime) .- *B. R. G. M., rapport inédit, 68 SGL 084 PNO, 12 juin 1968:*

(14) BAZIN F. (1963) .- L'utilisation des modèles pour les études de nappes souterraines .- *Mémoires A.I.H., vol. IV, Réunion de Rome 1961, p. 30-33.*

(15) BERKALOFF E. (1963) .- Influence des marées sur la salure d'eau souterraine . - *B. R. G. M., rapport inédit, DS 63 A 116, novembre 1963.*

(16) BIDOVEC F. (1967) .- The hydrosystem of karstic springs in the Timavo basin .- *Publication n° 73 de l'I.A.S.H., Symposium deDubrovnik 1965, p. 263-274.*

(17) BLANC J.J. (1970) .- Le karst sous-marin au Sud de la Provence et ses problèmes .- *Lab. géog. Fac. Lettres. Sci. Hum-Aix, 1970, "Méditerranée" num. 7, p. 123-124.*

(18) BONNET A., PALOC H. (1969) .- Les eaux des calcaires jurassiques du bassin de Montbazin-Gigean et de ses bordures .- *Bull. B. R. G. M., 2ème série, n° 3, 1969, p. 1-12.*

(19) BONNET A., PALOC H. (1969) .- Résumé de l'exposé sur les conditions hydrogéologiques du bassin de Montbazin-Gigean (Hérault). Excursion des géologues du Languedoc du 16 mars 1969 . - *Ann. Soc. Hortic. Nat. Hérault, 1969, vol. 109, Num. 2, p. 102-105.*

(20) BRAUDO C.J., MERO F., MERCADO A. (1968) .- (Submarine spring discharge using radioactive tracers). Evaluation du débit d'une source sous-marine à l'aide de traceurs radio-actifs .- *in Journal of the hydraulic division, proceedïngs o f the A. S. C.E. (U.S.A.), vôl. 94, n° Hy 2, March 1968, p. 399-409.*

(21) BREUSSE I., DUPRAT A. (1966) .- Contribution de la géophysique à l'étude des invasions marines .- *Mémoires A.I.H., vol. V1, Réunion de Belgrade 1963, p. 71-78.*

(22) BURDON D.J., PAPAKIS N. (1961) .- Methods of investigating the ground water resources of the Parnassos-Ghiona limestones
.- *Publication n° 57 of the I.A.S.H., p. 143-159.*

(23) BURDON D.J., DOUNAS A. (1961) .- Hydrochemistry of the Parnassos-Ghiona aquifers and problems of sea-water contamination in Greece .
- *Publication n° 57 of the I. A. S. H., p. 689-704.*

(24) BURDON D.J. (1967) .- Hydrogeology of some karstic,areas of Greece .
- *Dubrovnik Symposium 1965, Hydrology of Fractured Rocks, Publication n° 73 of the I.A.S.H:, v. 1, p. 308-317.*

(25) CALVINO F., STEFANON A. (1963) .- Osservazioni geologische sulla polla Rovereto i gli altre sorgenti sottomarine della Mortola (Riviera di Ponente)
. - *Atti de ll Ist. di Geol. de lla Universita de Genova, Vol. I, Fasc. 1, p. 205-239.*

(26) CALVINO F., STEFANON A. (1969) .- The submarine springs of fresh water and the problems of their capture .-
2n Rapp. Comm. int. MerMédit.., 19, 4, p. 609-610.

(27) CARAIVAN G. (1972) .- Les sources sous-marines de la côte sud roumaine de la Mer Noire .- *Terra, Roman., 1972, 24, n° 5, p. 55-56.*

(28) CASSINIS R. (1967) .- Ricerca sugli efflussi di acqua dolce lungo le coste siciliane mediante misure di salinita in mare .
- *La Ricerca Scientifica, 37, 3, p. 267-280 (Roma 1967).*

(29) CAZAL A., POUCHAN P., VOUVE J. (1970) .- Détection à distance par radio métrie infra-rouge des émergences de la Gironde. Relations avec l'aquifère côtier .
- C. *R. Acad. Sc. Paris, t. 270, série D, p. 760-763, séance du 9 février 1970.*

(30) CAZAL A., MOUSSIE B., SALVAYRE H. (1971) .- Application de la radiométrie infra-rouge à l'étude des écoulements des eaux superficielles et souterraines dans l'étang de Salses-Leucate (P.-0.) .
- *C. R Acad. Sci., D, Fr., 1971/6, t. 272, num. 24, p. 3013-3016.*

(31) CE LET P. (1971) .- Quelques aspects de l'hydrogéologie des régions calcaires méridionales du Parnasse-Helicon (Grèce)
- *Actes coll. hydro. pays calcaires, Besançon, p. 13-23.*

(32) CLUSEAU R. (1965) .- Mission expérimentale à La Ciotat et Cassis - Recherches des émergences d'eau douce en mer .
- B. *R. G. M., rapport inédit, DS 65 A 73, 22 septembre 1965.*

(33) CODEX R., SIMIONESCU N. (1966) .- Application de la méthode électrométrique dans l'étude des eaux souterraines de la zone karstique du lac Siut-Ghiol .
- *Mémoires A. I. H., vol. V1,Réunion de Belgrade 1963, p. 81-87.*

(34) COMPAGNIE DE PROSPECTION GEOPHYSIQUE FRANCAISE (1960) .- Essais de recherche d'une circulation karstique : Fontaine de Salses,étude géophysique .
- C. P. G. F., *rapport inédit, Service du Génie rural de l'Aude.*

(35) CORBEL J. (1957) .- Les Karsts du Nord-Ouest de l'Europe .-
Institut des études rhodaniennes, Mémoires et Documents, n° 12, Lyon.

(36) CORNET G. et al. (1963) .- La source sous-marine de Port-Miou (Calanques de Cassis). Etude par prospection géophysique .
- *Chronique d'hydrogéologie, n° 2, juin 1963, p. 47-51.*

(37) CORROY G. et al. (1958) .- Les résurgences sous-marines de la région de Cassis .- Bull. *Inst. Océan. Monaco, vol. 55, n° 1131, 27, novembre 1958, p. 1-35.*

(38) COTECCHIA V. (1963) .- Geohydrological aspects of the Cretaceous limestone aquifer in Apulia, and their bearing on the pratical avoidance of sea water contamination in extraction from wells and springs.
- *Quad. geofis. appl . Ital., t. 24, p. 39-79.*

(39) COTECCHIA V., MAGRI G. (1966) .- Idrogeologia del Gargano
.- *Geol. appl. Idrogeol. , 1 (Bari 19661, p. 1-86.*

(40) COTECCHIA V. (1971) .- Studies and modern research methodologies on the huge aquifer and the coastal springs of the calcareous formations of apulia (southern Italy).
(ABS) .- *Conf. Reg. Asie A. I. H. S. , août 1971, Tokyo, 1971, part. 71, p . 1.*

(41) CUSTODIO E., BAYO A., ORTI F. (1971) .- Caractéristiques géologiques, hydrogéologiques, géochimiques des aquifères côtiers entre Cambrils et Ametlla de Mar (Tarragone) .-
in : 1 Congr. hisp.Luso-am. geoZ. econ., secc. 3 hidrogeol., Madrid, Lisboa, 1971.
S. Z. , (.2971), p. 147-170.

(42) CVIJIC J. (1960) .- La géographie des terrains calcaires .
- *Académie serbe des sciences et des arts, Monographie, t. 341, n° 26, Belgrade 1960.*

(43) DEBUISSON J., LEMAIRE B., PALOC H. (1966) .- Les sources littorales et sous-marines du Languedoc-Roussillon. Etude documentaire préliminaire.
.- *B. R. G. M., rapport inédit, DS 66 A 63.*

(44) DEGALLIER R. (1963) .- Contact eau douce-eau salée .
- *Chronique d'hydrogéologie, n° 1, mars 1963, p. 9-22.*

(45) DELANY F., MENARD F. (1964) .- Note sur les résurgences entre Villefranche et Menton (Alpes Maritimes) .- *B. R. G. M., rapport inédit, DSGR 64 A 21, 29 février 1964.*

(46) DELGADO NAVARRO J.A., ESPINOSA GIL V. M. (1971) .- Prospection géophysique en mer pour localiser des résurgences d'eau douce au large de Calpe (Alicante) .- *in : 1er Congr. hispano-luso-am. geol. econ. Madrid-Lisboa, 1971, Madrid, Iberica Tarragona, (s. d), 6,p. 81-85:*

(47) DROGUE C. (1965) .- Sur la contamination par. l'eau de mer des sources karstiques d'une partie du littoral méditerranéen français (Languedoc-Roussillon) .- *A. I. H. Congrès d'Hanovre 1965, Résumé des communications, n° 14-25, p. 33. (Cette communication ne figure pas dans les Mémoires du congrès).*

(48) DUBOIS P., GRIOSEL Y. (1963) .- La source sous-marine de l'Abysse (Etang de Thau, Bas-Languedoc) .- *Spelunca, Mémoires, n° 3, p. 87-91.*

(49) DUBOIS P. (1964) .- Esquisse de l'hydrogéologie du massif de la Gardiole.
- *Spelunca, Mémoires, n° 4, p. 57-67.*

(50) DUROZOY G., PALOC H. (1966) .- Projet de captage expérimental de la résur gence sous-marine de Port-Miou (Cassis - Bouches du Rhône).
- *B. R. G. M., rapport inédit, DS 66 A 124.*

(51) DUROZOY G., PALOC H. (1967) .- Recherches sur les ressources en eaux karstiques du littoral méditerranéen français .
- *Publication n° 72 de l'A.I.H.S. Symposium de Haïfa, p. 457-465.*

(52) DUROZOY G., PALOC H. (1969) .- Bassin du Beausset (Bouches du Rhône-Var): enseignements apportés par les expériences de coloration.
- *B. R. G. M. , rapport inédit, 69 SGL 212 PRC, septembre 1969.*

(53) F.A.O. (1963) .- Etat des connaissances sur l'hydrogéologie karstique du Maroc par HAZAN R. et MONITION L.. Contributions to the investigations and development of the karst aquifers of the circum mediterranean countries .- *F.A.O. Athènes 1963.*

(54) F.A.O. (1963) .- The karst groundwaters of Syria par BURDON J. et SAFADIC. Contributions to the investigations and development of the karst aquifers of the circum mediterranean countries.
- *F.A.O. Athènes 1963.*

(55) F.A.O. (1963) .- The karst groundwater resources of Parnassos-Ghiona [Greece) . *F.A.O. Athenes 1963. Un volume ronéotypé (par BURDON D.I.-D.J. et PAPAKIS N.).*

(56) F.A.0. (1963) .- Handbook of karst hydrogeology (with special reference to the carbonate aquifers of the Mediterranean region) .
- *F.A.0. Athenes 1963 (Institute for geology and subsurface research,1, Hippokratous street, Athenes),(par BURDON D.J. et PAPAKIS N.).*

(57) F.A.O. (1964) .- Karst groundwater investigations in Greece - *FA O/SF : 2 GRE.*

(58) F.A.0. (1972) .- Study of water resources and their exploitation for irrigation in Eastern Crete (Greece) - Study of the Almyros spring of Iraklion,
- *AGL : SG/GRE 31, Technical report 3.*

(59) F.A.0. (1973) .- Karst hydrology in eight circum mediterranean countries. First preliminary edition.
- *UNESCO – FAO, Paris, March 1973.*

(60) FERGUSON G.E. and others (1947) : Springs of Florida.
- *Florida Geol. Survey, Bull. 31, 196 p.*

(61) FLATHE H. and PFEIFFER 0. (1964) .- Outlines on the hydrogeology of the Isle of Madura (Indonesia) .
- *Internat. Assoc. Sci. hydrology, Berkeley 1963, Commission of Subterranean Waters, n" 64, p. 543-560.*

(62) FROGET C. (1964) .- Sur les sources thermales sulfureuses de l'anse d'Arnette (chaîne de la Nerthe, Bouches du Rhône).
- *C.R. Soc. géol. Fr., n' 9, 1964, p. 365-366.*

(63) GALLOCHER P. (1954) .- Contribution à l'étude de l'émergence sous- marine de Port-Miou (Cassis - Bouches du Rhône) .
- *Annales de Spéléo., t. IX, 1954_, p. 169-181.*

(64) GEZE B. (1938) .-Les sources mystérieuses des monts de la Gardiole (Hérault).
- *in "La Géographie", t. 69, 1938, n' 4, p. 193-208.*

(65) GLANZ T. (1965) .- Le phénomène des moulins marins d'Argostoli. Etudes hydrauliques et physiques .
- *in Steir. Beitr. Hydrogeol., 1965, n' 17, p. 113-127.*

(66) GOT H., PLEGAT R. (1965) .- Sur l'origine de la salure des sources karstiques des environs de Salses .
- *in Naturalia Monspe liensa. Mém., Série Géologie, 1965, t. VII, p. 39-41.*

(67) GRUVEL A. (1929) .- De quelques particularités océanographiques observées sur les côtes de Syrie .- C. *R. Acad. Set. Paris, 189 (1929).*

(68) GRUVEL A. (1930) .- De quelques sources marines observées sur les côtes Libano-Syriennes .- *C. R. Acad. Sei. Paris, 191 (1930)* .

(69) GUNAY G. (1972) .- Determination of the origin of Ovacik submarine springs by means of natural isotopes .- *Mémoires A.I.H., vo Z. IX, Réunion de Tokyo 1971, p. 136-139.*

(70) HANSHAW B.B., BACK W., RUBIN M. (1965) .- Carbonate equilibria and radiocarbon distribution related to groundwater flow in the Floridan limestone aquifer-U.S.A.
-*Publication n°74 of the I.A.S.H. 1967, Symposium de Dubrovnik, vol. II, p. 601-614.*

(71) HAZAN R. and FERRE M. (1964) .- Exploitation d'une nappe karstique à proximité d'océan (région d'Oualidia) .
- *Internat. Assoc. Sci. hydrologie, Berkeley 1963, Commission of Subterranean Waters, n° 64, p. 561-563.*

(72) HENRY H.R. and KOHOUT F.A. (1972) .- Circulation patterns of saline groundwater affected by geothermal heating as related to waste disposal .
- in *Am. Ass.* of *Petroleum geologists, Mémoire n° 18, p. 202-221.*

(73) JENKO F. (1967) .- L'hydrographie du karst (Karst hydromechanics).
- *Dubrovnik Symposium 1965, Hydrology* of *Fractured Rocks, v. 1, p. 172-182.*

(74) JEVREMOVIC M. (1966) .- Hydraulic characteristics and classification of brackish springs in the adriatic zone of the dinamic karst .
- *Mémoires A.I.H., vol. VI, Réunion de Belgrade 1963, p. 293-297.*

(75) KARAGEORGIOU E. (1966) .- Les sources thermominérales côtières de Potamion de l'Ile Samos .
- *Mémoires A. I. H., vol. VI, Réunion de Belgrade 1963, p. 311-318.*

(76) KAREH R. (1968) .- Les sources sous-marines de Chekka (Liban nord), Exploitation d'une nappe. karstique captive à exutoires sous-marins (2ème partie) .- Rev. *Liban. Geogr. Hannon,* 1968, vol. 3, p. 93-121.

(77) KIKNADZE T.Z. (1965) .- Some conditions affecting the karst development in Arabika Massif (Caucasus, Western Georgia) .- *in Problems of the speleological research", t. 1, Prague,* 1965, p. 55-63.

(78) KOHOUT F. A. (1960) .- Cyclic flow of salt water in the Biscayne aquifer of Southeastern Florida .- *Journ.* of *Geophys. Res.,* 65, 7 (1960).

(79) KOHOUT F.A. (1961) .- Case history of salt water encroachment caused by a storm sewer in Miami .
- *Journal of Am. Wat. Works Association, vo Z.* 53, *n° 11, p.* 1046-1416.

(80) KOHOUT F.A. (1961) .- Fluctuating of ground-watér levels caused by dispersion of salts .- *in Journ. of Geophys. Res., vol. 66, n ° 8, August t* 1961.

(81) KOHOUT F.A. (1965) .- A hypothesis concerning cyclic flow of salt water related to geothermal heating in the Floridian aquifer
- *Reprinted from Transactions of the New York Academy o f Sciences, série II, vo Z.* 28, *n ° 2, p.* 249-271, *décembre* 1965.

(82) KOHOUT F. A. (1966) .- Submarine springs : a neglected phenomenon of coastal hydrology.- *Reprintad from Central Treaty organisation's symposium on hydrology and mater resources development, February* 5-12, 1966.

(83) KOHOUT F.A. (1966) .- Submarine springs .
- *Extract from "Encyclopedia of Earth Sciences, Oceanography, vol. I, p.* 878-883, *Reinhold Pub Z. Co.*

(84) KOHOUT F. A., KOLIPINSKI M. C. (1967) .- Biological zonation related to groundwater discharge along the shore of Biscayne Bay, Miami (Florida) .
- *Reprinted from Estuaries, Am. Ass. For the Advancement of Science, p. 488-499.*

(85) KOHOUT F.A., KLEIN H. (1967) .- Effect of pulse recharge on the zone of diffusion in the Biscayne aquifer .- *I.A.S.H. pub lication n°* 70, *Symposium of Haifa, p.* 252-270.

(86) KOHOUT F.A. (1967) .- Ground-water flow and the geothermal regime of the Floridian plateau .- *Reprinted from Transactions of the gulf coast association of geological societies, vol. XVIII, p. 339-354.*

(87) KOHOUT F. A., MEYER E.L., SUN R.J. .- Submarine spring discharge using radioactive tracers - Discussions .
- *in Journ. of the hydraul. div., proceedings of the ASCE (USA), vol. 95, n° Hy 1, January 1969, p. 512-514.*

(88) KOHOUT F.A., SACHS M.S. (1970) .- Modifying the water balance by desalination .
- *in "Water Balance in North America, A. W. R. A.*

(89) KOLODIAJNAIA A. (1964) .- Influence of the chemical composition of atmospheric precipitations on sea-littorals upon karst formation .
- *Mémoires A. I. H., t. V, Réunion d'Athènes 1962, p. 249-255.*

(90) KOMATINA M. (1973) .- Groundwaters of the Crebia littoral karst under the natural and artificially modified conditions .- *Manuscrit inédit remis à la Commission de l'hydrogéologie du karst de l'A.I. H.*

(91) KOVACEVIC S., KRULC Z. (1968) .- Some aspects of geoelectrical investigation for ground water in the Yugoslav karst region .
- *Mémoires A. I. H. , vol. VIII, Réunion d'Istanbul 1967, p. 463-474.*

(92) KUSCER 3. (1950) .- Kraski izviri ob morski obali-Karst : Source at the Sea Coast . - *Acad. Sc. Art. Slovenica, clas. 3, ser. A, p. 97-147 (1950)* .

(93) KUSCER I., KUSCER D. (1964) .- Observations on brackish karst sources and sea swallow-holes on the Yugoslav coast.
- *Mémoires A. I. H. , vol. V, Réunion d'Athènes 1962, p. 344-353.*

(94) LAUNAY L. de (1902) .- Traité des eaux minérales, p. 490.

(95) LAVERTY F.B., VAN DER GOOT H.A. (1955) .- Aménagement d'un barrage d'eau douce en Californie du Sud. (Conférence annuelle de Chicago) .
- *J.A.W.W.A., vol. 47, n° 9, p. 886-908.*

(96) LEGRAND H.E., STRINGFIELD V.T. (1973) .- Karst hydrology. A review.
- *in Journ. of hydrology, 20 (1973); p. 97-120.(en particulier p. 107 d 112 + références bibliographiques).*

(97) LEMAIRE B., PALOC H. (1967) .- Captage de la source sous-marine de la Vise (Hérault-France) .- *Asa. gén. de l'A.I.H. Prague 1968, Résumé des communications, p. 65 (et rapport inédit B. R. G. M., DSGR 67 B 10 du 22 septembre 1967; 6 p.)* .

(98) LOVE S.K. (1945) .- Cation-exchange in ground-water contaminated with sea-water near Miami, Florida .- *Am. Geophys. Union Washington 1944, Trans., PT. 6, p. 951-955.*

(99) MACAU-VILAR F. (1966) .- Détermination des niveaux phréatiques d'un massif calcaire à partir d'une exploration sous-marine préliminaire .
- *Serv. géoL, Bol. Esp., n° 23, p. 33-65.*

(100) MACAU-VILAR F. (1967) .- Détermination des niveaux phréatiques des eaux douces dans un massif calcaire de la Costa Brava (Espagne) à partir d'une exploration sous-marine préalable.
- *Pub Z. Assoc. Intern. HydroL. Sci. , no 74, 1967, p. 455, 462. (Actes du Colloque d2 Dubrovnik, 1965, vol. 2).*

(101) MALEZ M. (1965) .- The Medvjedja Pecina (Bear Cave) of Losing Island a rare case of submerged cave .
- *in "Problems of speleological research", t. 1, Prague 1965, p. 211-216.*

(102) MANDEL S. (1959) .- The cretaceous limestone aquifer of central Israël .
- *Mémoires A. I. H., vol. II, Réunion de Liège 1958, p. 48-52.*

(103) MANDEL S. and MERO F. (1961) .- Planned exploitation of the aquifer feeding the Na'Aman spring .
- *Internat. Assoc. Sci Hydrology, Pub Z. n° 57, p. 654-650. (Colloque d'Athènes 1961, Eaux souterraines dans les zones arides, t. 2, vol.2).*

(104) MANDEL S.(1964) .- The mechanism of sea-water intrusion into calca reous aquifers .
- *Internat. Assoc. Sci. Hydrology, Berkeley 1963, n ° 64, p. 127-131.*

(105) MANDEL S., GILBOA Y., MERCADO A. (1972) .- Groundwater flow in calcareous aquifers in the vicinity of Barcelona (Spain).
- *Ass. internat. Sc. hydrol., Bull., Belg. 1972, 17, n° -1, p. 77-83.*

(106) MARTEL E.A. (1921) .- Nouveau traité des eaux souterraines.
- *Ed. DOIN - Paris.*

(107) MARTIN A., MOUSSU H. (1967) .- Recharge artificielle de la nappe de Sébikotane (calcaires Karstiques) par création d'une retenue d'eau au droit d'une vallée fossile quaternaire (sable) entaillant les calcaires
.- *Mémoires A.I.H., t. VIII, 1968, Congrès d'Istanbul, p. 256-264.*

(108) MARTIN C. (1968) .- La résurgence sous-marine de Port-Miou.
- *Spelunca, bul Z-FR. , 1968, vol. 8, num . 3, p. 14-20.*

(109) MAURIN V., ZOTL J. (1960) .- Karsthydrologische Aufnahmen auf Kephallenia (Ionische Inseln) .
- *Steir. Beitr. Hydrogeol., Dtsch., n° 1, 52 p.*

(110) MAURIN V., ZOTL J. (1965) .- Salt water encroachment in the low altitude Karst water horizons of the Island of Kephallinia (Ionian Islands).
- *Publication n°74 of the I.A.S.H. 1967, Symposium de Dubrovnik, vol. 2, p. 423-438.*

(111) MERO F. (1964) .- Barbutium springs follow-up report (September 1963 to May 1964) .
- *Tahal. Water planning for Israel 2TD, Tel Aviv, May 1964, P. N. 426.*

(112) MIJATOVIC B. (1963) .- Importance des recherches hydrogéologiques complexes des sources littorales et sous-marines dans le karst littoral .
- *Mémoires A.I.H., vol. IV, Réunion de Rome 1961, p. 76-80.*

(113) MIJATOVIC B. (1964) .- Contribution à la solution qualitative du problème de l'équilibre hydraulique de l'eau douce et salée dans les collecteurs du Karst littoral
.- *Mémoires A. I. H., t. V, Réunion d'Athènes 1962, p. 184-193.*

(114) MIJATOVIC B. (1966) .- Les études sur les modèles du rapport des eaux douces et salées .
- *Mémoires A. I. H., vol. VI,Réunion de Belgrade 1963, p. 141-148.*

(115) MIJATOVIC B. (1967) .- Mécanisme hydraulique des nappes karstiques dans les bas collecteurs littoraux .
- *Bull. Inst. Rech. Géol Géophys., t. VII, série B, p. 5-114, Belgrade 1967.*

(116) MIJATOVIC, BAKIC M. (1967) .- Le Karst du Liban. Etude de son évolution d'après les recherches hydrogéologiques .
- *Chronique d'hydrogéologie, n° 10, mars 1967, p. 95-107.*

(117) MIJATOVIC B. (1969) .- Méthodes géoélectriques dans la solution des problèmes hydrogéologiques ayant trait à la recherche des eaux souterraines dans le Karst .
- *in Expert meeting on the cooperative rote of hydrogeology and geophysics in ground water exploration, Budapest 1969.*

(118) MIJATOVIC B. (1973) .- Problème de la contamination des captages par l'eau salée dans les aquifères karstiques littoraux.
- *Rapport inédit, A.I.H. Commission de L'hydrogéologie du karst, réunion de Split, 3 octobre 1973.*

(119) MISTARDIS G. (1953) .- Sur le drainage karstique dans les régions calcaires côtières de la Grèce méridionale .
- *in Actes du ter Congrès international de Spéléologie, Paris 1953, vol. 2, p. 247-250.*

(120) MISTARDIS G. (1967) .- Recherches hydrogéologiques dans la région des lacs karstiques béotiens .
- *Publication n° 73 de l' I.A.S.H, Symposium de Dubrovnik 1965, vol. 1, p . 162- 170.*

(121) MISTARDIS G. (1967) .- Sea level fluctuations in Pleistocene and submarine spring-whirls in Greek central area .
- *Mémoires A.I.H., vol. VII, Réunion dHannovre 1965, p. 81-83.*

(122) MISTARDIS G. (1967) .- Influence des changements du niveau de la mer (au Pleistocène) sur l'hydrologie de l'Attique occidentale calcaire et des régions voisines .- *Mémoires A. I. H.* , vol. *VII, Réunion d'Hanovre 1965, p. 84-86.*

(123) MISTARDIS G. (1968) .- Investigations upon influences of ses level fluctuations on underground karstification in some coastal regions of south Greece .
- *2n Actes du 4ème Congrès international de Spéléologie, Ljubljana 1965, t. III, p. 335-340.*

(124) MISTARDIS G. (1969) .- Investigations upon submarine and coastal springs in south Greece .
- *in Actes du Sème Congrès international de Spéléologie, Stuttgart 1969, vol. 5, Hy 5/1 à 8 (bibliographie à voir).*

(125) MONTORIOL POLIS J. (1961) .- Las surgencias de las Costas de Garraf (Barcelona) .
- *in Actes du Sème Congrès international deSpéléologie, Vienne 1961; Vol. 5, p. 43--49.*

(126) MORETTI A., PANNUZI L., STAMPANONI G., ZATTINI N. (1967) .- Synthèse des connaissances géo-hydrologiques des formations calcaires en Italie .
- *Publication n° 73 de l'I.A.S.H.., Symposium de Dubrovnik 1965, vol. I, p. 293-307.*

(127) MOULLARD L., MIJATOVIC B., KAREH R., MASSAAD B. (1967) .
Exploitation d'une nappe Karstique captive à exutoires sous-marins, problèmes posés et solution adoptée côte libanaise .
- *Publ. Assoc. Intern. HydroL ScÎ., 1967; vol. 1, p. 237-250.*

(128) MOUSSU H., MARTIN A. (1965) .- Essai de suralimentation de la nappe des calcaires de Sébikotane par la création d'une retenue.
- *Mémoires A. I. H. , t. VII, 1967, Congrès d'Hanovre, p. 283-285.*

(129) MUNCK F. (1969) .- Quelques exemples d'applications géophysiques nouvelles dans la recherche d'eau douce en zone littorale française de la Méditerranée .
- *Expert meeting on the cooperative rote of hydrogeology and geophysic in ground water exploration, Budapest, 1969, Dokument. Tajekoztato. Iroda., num. 1-14, p. 1-12.*

(130) PALAUSI G. (1968) . Les résurgences sous-marines entre l'Esterel et le Cap d'Antibes (A.M.) .
- *Rec. Trav. Stn. Mar. Endoume.Bull-FR, 1968, vol. 59, num. 43, p. 397-404.*

(131) PALOC H. (1969) .- Etude des sources de Cauvy (Balaruc- les Bains ,Hérault). Observations faites en 1968 .
- *B. R. G. M., rapport inédit, 69 SGL 017 LRO, 3 janvier 1969.*

(132) PALOC H. (1971) .- Détection, étude et captage des sources sous-marines Karstiques. Possibilités et tendances actuelles.
- *2ème colloque international de spéléologie, Athènes,29 août- ler septembre 1971 (sous presse).*

(133) PAPAKIS N. (1964) .- Problèmes hydrogéologiques de la Grèce.
- *Mémoires A. I. H. , t. V, Réunion d'Athènes 1962, p. 288-309.*

(134) PAPAKIS N. (1967) .- Étude des nappes d'eau souterraine Karstiques en Grèce .
- *Conférence internationale de L'eau pour la paix, Washington DC. A/64, 23-31 mai 1967:*

(135) PAVLIN B. (1973) .- Formation des barrages souterrains et utilisation des barrages souterrains naturels pour la réalisation de réservoirs souterrains dans la région maritime Karstique des sources et leur protection contre les eaux de mer.
- *Commission internationale des grands barrages Q40-R33.*

(136) PETRIK M. (1965) .- Characteristics of water from springs in the limestone region of Croatia .
- *Publication n° 94 of theI. A. S. H. , 1967, Symposium de Dubrovnik, vol. 2, p. 624-634.*

(137) PETROCHILOS J. (1963) .- Recherches hydrospéléologiques dans la région de Dyros en Laconie (Grèce) .
- *in Actes du 3ème Congrès internationale de Spéléologie, Vienne 1961, vol. II, p. 183-190.*

(138) POTIÉ L., RICOUR J. (1973) .- Études et captage de résurgences d'eau douce sous-marines.
- *Revue technique internationale de l'eau, octobre 1973.*

(139) POTIÉ L. (1973) .- Études et captage de résurgences d'eau douce sous-marines : résurgences sous-marines de Port Miou (France) .
- *Actes colloque internationale sur les eaux souterraines, Palerme, avril-mai 1973.*

(140) POTIÉ L. (1974) .- Captage des résurgences sous-marines d'eau douce.
- *Communication préparée pour le congrès de l'Association internationale des Distributeurs de l'Eau, Brighton, août 1974.*

(141) REINA C. (1962) .- Fondamenti idrogeologici e possibilita pratiche di ridurre la salinita dell'acque delle sorgenti carsiche salmastre del Chidro in Puglia .
- *Boll. Geofis. teor. appl., Ital., t. 4, n° 16, p. 372-418.*

(142) REINA C. (1963) .- Le sorgenti carsiche salmastre del Chidro.
- *Mémoires A.I.H., vol. IV, Réunion de Rome 1961, p. 99-104.*

(143) REINA C., MONGELLI F. (1964) .- Primi elementi sulla permeabilita del complesso calcareo carsico della regione di Puglia (Italie méridionale) .
- *Mémoires A.I.H., t. V, Réunion d'Athènes 1962, p. 330-333.*

(144) REINA C., MONGELLI F. (1966) .- Regime termico di una falda di aqua dolce proggiante in equilibrio sulle acque marine .
- *Mémoires A.I.H., vol. VI, Réunion de Belgrade 1963; p. 229-231.*

(145) REVELLE R. (1941) .- Criteria for recognition of sea water in groundwater .
- *Am. Geophys. Union. Trans., v. 22, PT. 3, p. 593 597.*

(146) RICOUR J. (1973) .- Le barrage souterrain de Port Miou (Bouches du Rhône) .
- *B. R. G. M., Bull. de liaison et d'information, n ° 43, 20 mars 1973.*

(147) ROBINOVE C.J. (1965) .- Infrared photography and imagery in water resources research .
- in *Journal Ameriean Water Works Ass. (U. S. A.), 57, 7, p. 834-840.*

(148) ROGLIC J. (1965) .- The depth of the fissure circulation of water and the evolution of subterranean cavities in the dinaric karst
.- Internat. Speleol. Conf., BRNO 1964, Problems Speleol. Research, p. 25-35.

(149) ROQUES H. (1956) .- Localisation conductimétrique des émergences sous-marines de Port-Miou .
- Annales de Spéléo.., t. XI, 1956, p. 109-112.

(150) ROUAUO A., ROGIN G. (1969) .- Localisation par la méthode du bipole magnétique oscillant d'une cavité karstique à Port-Pin-Port-Miou (Cassis).
- B. R. G. M., rapport inédit,69 GPH 037.

(151) SALVAYRE H. (1970) .- Arguments en faveur de l'existence d'un karst noyé sur la bordure est des Corbières (Font Estramar - Font Dame) .
- Spelunca, Mémoires, n° 7, p. 79-86.

(152) SALVI A. (1969) .- Localisation d'une cavité karstique par des mesures magnétiques statiques .
- (C.E.N.G. - S. E. M.) - Rapport inédit.

(153) SIPLE G.E. (1967) .- Salt-water encroachment of tertiary limestones along coastal south Carolina .
- Dubrovnik Symposium 1965, Hydrology of Fractured Rocks, v. 2, p. 439-453.

(154) STEFANON A., COTECCHIA F. (1969) .- Prime notizie sulle caratteristiche di efflusso e sulle modalita di investigazione delle sorgenti subacque ai fini di una loro captazione .
- in Quaderni de La Ricerca Scientifica, n° 58, p. 165-195.

(155) STEFANON A. (1972) .- Capture and exploitation of submarine springs.
- in Oceanology international, Congrès de Brighton, March 1972, p. 427-430.

(156) STRINGFIELD V.T. (1964) .- Relation of surface-water hydrology to the principal artesian aquifer in Florida and southeastern Georgia .
- U. S. *Geol. Survey Prof. Paper 501-C, p. 164-169.*

(157) STRINGFIELD V.T. (1966) .- Artesian water in tertiary limestone in the southeastern states .
- U. S. *Geol. Survey Prof. Paper 517, 226 p.*

(158) STRINGFIELD V.T., LEGRAND H.E. (1969) .- Relation of ses-water to fresh water in carbonate rocks in coastal areas, with special reference to Floride (U.S.A.) and Cephalonia (Kephallinia - Greece) .
- *in Journal of Hydrology, 9 (1969), p. 387-404.*

(159) THIRRIOT C. (1971) .- Résurgence de la rivière Port-Miou : étude schématique à l'aide d'un modèle analogique des écoulements en période de crue .
- S. *E. M. - B: R. G. M. , rapport inédit, CT. 323.*

(160) VAUMAS E. de (1970) .- Formes de relief, consolidation et dissolution des grès littoraux du Quaternaire – Méditerranée orientale (Syrie, Liban, Palestine, Chypre) .
- *Lab. Géogr.Fac. Lettres. Sc. Hum. Aix, 1970, Méditerranée, n° 7,p. 151-188.*

(161) VELIMONOVIC J. and CUBRAKOVIC V. (1967) .- Hydrogeological problems in the Karst coastal ares CABS) .
- *Dubrovnik Symposium 1965, Hydrology of fractured rocks, v. 2, p. 517.*

(162) VERDEIL P. (1971) .- Relations between the karstic conduits and the ses in the Languedocian littoral. Resulting phenomena of the pollution .
- *Int. Union. Geod. Geoph., Gen. Assem., Moscou, 1971, Symp. Air Water Pollution, ABS, 1971, p. 35.*

(163) WAIT R. L. and CALLAHAN J.T. (1965) .- Relations of fresh and salty ground water along the southeastern U.S. Atlantic coast.
- *Ground water,* v. *3, n° 4, p. 3-17.*

(164) WENTWORTH Ch.K. (1951) .- The process and progress of salt water, encroachment .
- *A.I. H. S., Ass. gen. Bruxelles 1951, t. 2, p. 238-248, (pub Z. n° 33J.*

(165) ZEKTZER I.S., IVANOV V. A., MESKHETELI A.V. (1973) .- The problem of direct groundwater discharge to the seas .
- *Journal of Hydrology, 20, 1973, p. 1-36 (très importante bibliographie).*

(166) ZORZI Ing.L. (1958) .- Possibilité de prélèvement d'eau douce des nappes soutenues par des eaux saumâtres .
- *Internat. Assoc.Sci. Hydrology, Toronto 1957, Comptes rendus, n° 44, p. 318 - 326.*

additif

(167) HAKIM B. (1974) .- Contribution à la détection des sources sous-marines et littorales de la côte libannaise par thermo-radiométrie infrarouge (secteur Beyrouth-Enfe) .
- *D.E.S. Sciences naturelles, Université de Montpellier, 27 juin 1974.*