

SÉDIMENTATION ET DIAGENÈSE DANS TROIS LAGUNES ÉVAPORITIQUES DE BASSE CALIFORNIE (MEXIQUE)

DONNÉES GÉOCHIMIQUES ET ISOTOPIQUES SUR LES SÉDIMENTS ET LES SAUMURES INTERSTITIELLES *

par Catherine PIERRE ** et Luc ORTLIEB ***

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉS	130	D — Données physico-chimiques des solutions	140
A — Introduction	131	1. Densité et température	140
B — Description des sites étudiés et travaux antérieurs	132	2. pH et potentiel d'oxydo-réduction	140
1. Saline Ometepec	132	3. Chimie des saumures	141
2. Système évaporitique de la lagune Ojo de Liebre	133	E — Géochimie isotopique des saumures	143
3. Complexe de la lagune Mormona	134	1. Compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène des eaux	146
C — Description des sédiments évaporitiques ..	134	2. Isotopes de l'oxygène et du soufre du sulfate aqueux	148
1. Profil de la saline Ometepec	134	F — Données isotopiques sur les gypses	151
2. Profil étudié au Sud-Est de la lagune Ojo de Liebre	136	1. Ometepec	151
3. Profil étudié au Sud du complexe de la lagune Mormona	136	2. Mormona	152
		G — Conclusions	154
		BIBLIOGRAPHIE	155

* Note présentée à la réunion organisée par la Recherche Coopérative sur Programme n. 459 (Genèse et nature des faciès confinés) sur le thème : « Apports de la géochimie à l'étude des évaporites », les 22 et 23 avril 1980 à Paris.

** Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie isotopique, Université Paris-Sud, Bâtiment 504, 91405 Orsay Cedex (France).

*** Mission O.R.S.T.O.M. au Mexique et Instituto de Geologia del Universidad Nacional Autonoma de Mexico, A.P. 1159, Hermosillo, Sonora, Mexico (Mexique).

Sciences de la Terre, Tome XXIV, pages 129 à 156, 18 fig., 2 tabl.

NANCY, septembre - décembre 1980

Fonds Documentaire ORSTOM



010015045

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: B * 15045 Ex: 1

ILLUSTRATIONS

Fig. 1. — Lagune Ometepec : localisation des sites de prélèvement	132
2. — Lagune Ojo de Liebre : localisation de la zone étudiée	133
3. — Complexe de la lagune Mormona : localisation de la zone étudiée	135
4. — Coupe sédimentaire du profil étudié à la lagune Ometepec	136
5. — Coupe sédimentaire du profil étudié à la lagune Ojo de Liebre	137
6. — Coupe sédimentaire du profil étudié à la lagune Mormona	139
7. — Évolution des concentrations en lithium en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona	142
8. — Évolution des concentrations en potassium en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona	142
9. — Évolution des concentrations en magnésium en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona	143
10. — Évolution des concentrations en calcium en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona	144
11. — Évolution des concentrations en sulfate en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona	144
12. — Évolution des concentrations en sodium en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona	145
13. — Évolution des concentrations en chlorure en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona	145
14. — Relation entre la composition isotopique de l'oxygène et la densité des saumures d'Ometepec, Ojo et Liebre et Mormona	146
15. — Relation $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ des saumures interstitielles de Mormona et d'Ometepec, et des eaux «mères» des gypses de Mormona et d'Ometepec	149
16. — Relation $\delta^{18}\text{O} - \delta^{34}\text{S}$ du sulfate aqueux des saumures interstitielles et des saumures affleurant à l'air libre à Ometepec, Ojo de Liebre et Mormona	150
17. — Compositions isotopiques de l'oxygène des eaux «mères» des gypses, et du soufre et de l'oxygène du sulfate des gypses dans la coupe 4 d'Ometepec	153
18. — Compositions isotopiques de l'oxygène des eaux «mères» des gypses, et du soufre et de l'oxygène du sulfate des gypses dans la coupe 17 de Mormona	153
Tabl. 1. — Données climatologiques simplifiées des trois régions étudiées	131
2. — Données physico-chimiques, chimiques et isotopiques sur les saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona	138

RÉSUMÉS

Les paragenèses évaporitiques à gypse, anhydrite, polyhalite et halite ont été antérieurement signalées dans les régions d'Ometepec, Ojo de Liebre et Mormona en Basse Californie.

Une étude géochimique et isotopique (^{18}O , ^2H , ^{34}S) des sédiments évaporitiques et des saumures interstitielles a été réalisée sur des échantillons prélevés en zone supratidale dans ces trois sites. Les résultats permettent de préciser dans chaque cas : (1) les conditions d'alimentation en eau marine et l'influence éventuelle des eaux d'origine météorique ; (2) l'importance de l'activité bactérienne sulfato-réductrice dans l'évolution des sulfates ; (3) les modalités de formation et d'évolution diagénétique des minéraux évaporitiques.

*Sedimentation and diagenesis in three evaporitic lagoons of Baja California (Mexico).
Geochemical and isotopic data on sediments and interstitial brines.*

Gypsum, anhydrite, polyhalite and halite were previously studied in the areas of Ometepec, Ojo de Liebre and Mormona along the coast of Baja California.

Geochemical and isotopic (^{18}O , ^2H , ^{34}S) studies on evaporites and interstitial brines were performed on samples collected in supratidal areas of these three regions. In each case, analytical results lead to a better understanding of : (1) supply by marine intrusions and local influence of meteoric waters ; (2) the importance of sulphate reduction by bacterial activity in sulphate evolution ; (3) the processes of genesis and diagenesis of evaporite minerals.

A – INTRODUCTION

Du fait de son climat aride et de l'existence de conditions physiographiques localement favorables, la péninsule de Basse Californie (NW du Mexique) présente plusieurs bassins littoraux évaporitiques. Trois régions ont fait antérieurement l'objet de reconnaissance sédimentologique et ou géochimique des évaporites : saline Ometepec, lagune Ojo de Liebre, et lagune Mormona.

Dans ces trois zones, plusieurs profils longitudinaux ont été réalisés en avril et mai 1979 ; un profil représentatif de chacune de ces régions a été choisi pour une étude détaillée. Les trois secteurs étudiés se trouvent en zone supratidale, dans des systèmes d'alimentation en eau marine différents. L'approche par les méthodes de géochimie isotopique des gypses et des saumures, associées à celles de la sédimentologie classique et de l'hydrochimie, a pour but de préciser et de comparer les modalités d'alimentation en eaux marine et continentale des bassins, ainsi que les conditions de formation des évaporites.

	Température (air) moyenne annuelle	Précipitations moyenne annuelle	Évaporation an- nuelle eau douce	Vitesse moyenne des vents
Mormona ⁽¹⁾ (1948-67)	15,5 °C	125 mm	1800 mm	7 km/h
Ojo de Liebre ⁽²⁾ (1969-79)	18 °C	79 mm	1700 mm	20 km/h
Ometepec ⁽³⁾	18 °C	50 mm	2900 mm	5 km/h

Tableau 1. — Données climatologiques simplifiées des trois régions étudiées.

(1) Vonder Haar (1976) ; (2) Cie Exportadora de Sal, Ing. Coronel (communication personnelle, 1980) ; (3) Smith (1972) et Thompson (1968).

Les données climatiques principales des trois zones étudiées sont résumées dans le tableau 1. La saline Ometepec est la région la plus aride, caractérisée par des températures élevées (pouvant atteindre 50°C), une très faible pluviosité et une évaporation intense. La région de la lagune Ojo de Liebre est marquée par une pluviosité faible, une insolation limitée par de fréquentes brumes d'origine océanique et par des vents du NW forts et pratiquement quotidiens. La région de la lagune Mormona est tempérée par les influences océaniques prédominantes.

B – DESCRIPTION DES SITES ÉTUDIÉS ET TRAVAUX ANTERIEURS

1 – SALINE OMETEPEC

La saline Ometepec est située sur la bordure sud occidentale du delta du Colorado, dans le fond du Golfe de Californie (fig. 1). Cette légère dépression, d'amplitude décimétrique et de dimensions horizontales 20 x 5 km, est limitée à l'Ouest par un large piedmont et sur ses autres côtés par un platier supratidal argilo-limoneux. Séparée de la mer ouverte par un seuil d'une dizaine de km de largeur, cette cuvette allongée n'est généralement inondée par les eaux marines que deux fois par an, en janvier et juillet (Smith, 1972).

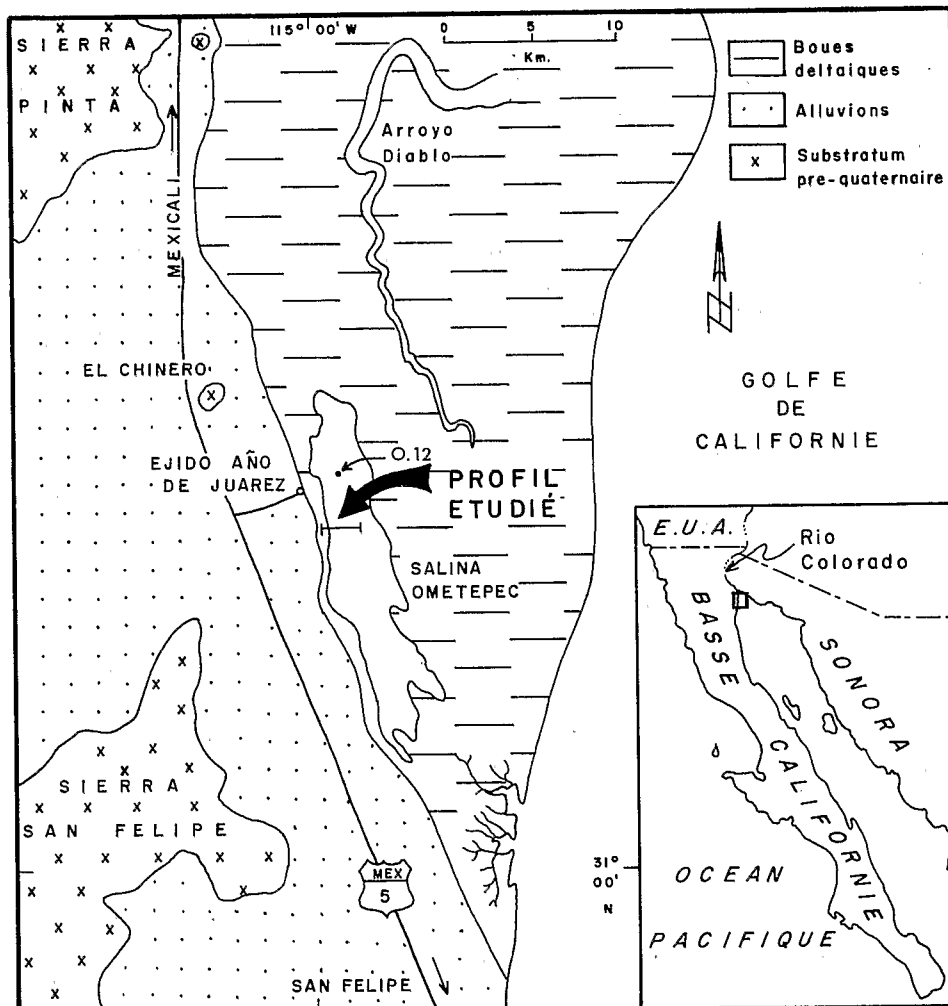


Fig. 1. — Lagune Ometepec : localisation des sites de prélèvement.

Outre la halite, exploitée depuis le début du siècle, le gypse et, pour une faible part, l'anhydrite, cristallisent dans cette saline (Kinsman, 1969 ; Butler, 1970 ; Shearman, 1970 ; Smith, 1971 a, b, 1972, 1973). L'ensemble des dépôts évaporitiques, d'une épaisseur maximale de 50 cm, repose sur un substratum constitué de sable argileux et d'argile brune.

Le profil étudié a été réalisé entre la marge occidentale et l'axe de la dépression, à environ 3 km au Sud de l'exploitation actuelle (fig. 1).

2 – SYSTEME ÉVAPORITIQUE DE LA LAGUNE OJO DE LIEBRE

La lagune Ojo de Liebre est située sur la façade pacifique de Basse Californie, à l'Est de la péninsule de Vizcaino (fig. 2). Elle représente actuellement la première saline mondiale sur le plan de la production de halite. Les aménagements apportés, depuis une vingtaine d'années, aux platiers évaporitiques entourant la lagune ont largement modifié les systèmes naturels décrits antérieurement (Phleger et Ewing, 1962 ; Holser, 1966 ; Phleger, 1969 ; Kinsman, 1969). Parmi les parti-

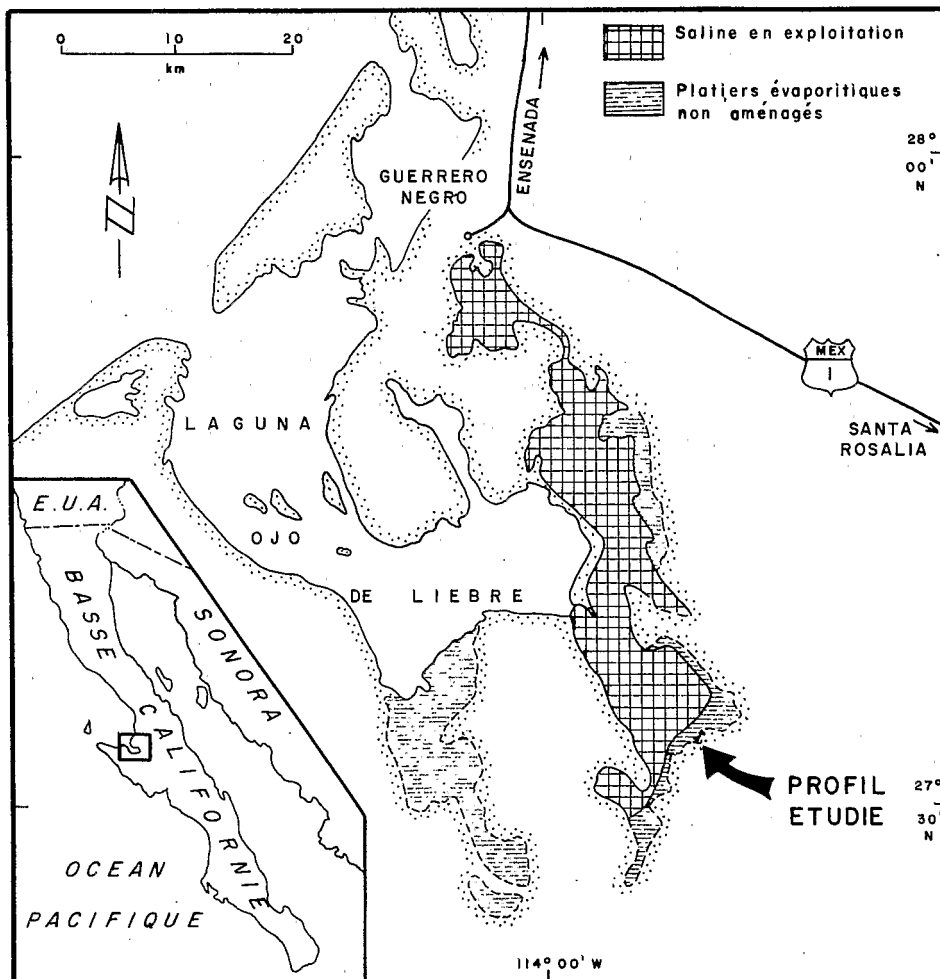


Fig. 2. — Lagune Ojo de Liebre : localisation de la zone étudiée.

cularités de cette zone ont été signalés le développement important de tapis algaires (Phleger et Ewing, 1962) et la formation de polyhalite diagénetique en zone supratidale (Holser, 1966).

En 1979, la plus grande partie des platiers évaporitiques étaient submergés et transformés en bassins de concentration. Toutefois, la polyhalite a été retrouvée dans un diverticule des anciens platiers évaporitiques au SE du complexe d'Ojo de Liebre (fig. 2). Ce diverticule, de dimensions 1,5 x 0,3 km, est entouré par des dunes datant probablement du début de l'Holocène. Le profil relevé permet d'observer, au-dessus du substratum de sables marins du Pléistocène supérieur, des horizons de gypse lenticulaire, des nodules de polyhalite et une mince croûte superficielle de halite.

3 - COMPLEXE DE LA LAGUNE MORMONA

L'ensemble des lagunes en eau, marais, platiers évaporitiques et salines, connu sous le nom de complexe de la lagune Mormona (Vonder Haar, 1972, 1976), est situé en bordure d'une large plaine côtière sur la façade pacifique de Basse Californie, au NNW de la lagune de San Quintin (fig. 3). Un cordon littoral de 20 km de long isole totalement la lagune Mormona de la mer et un large champ de dunes d'âge Pléistocène supérieur (?) la limite vers le Sud. Au Sud du complexe de Mormona, certaines dépressions interdunaires évoluent en cuvettes évaporitiques. L'ensemble du complexe est alimenté en eau marine par infiltration à travers le cordon dunaire littoral.

L'importance des précipitations de l'hiver 1978-1979 et l'inondation des platiers évaporitiques qui en a résulté nous a conduit à étudier principalement l'une de ces cuvettes interdunaires dont un diverticule était resté exondé. Localisée entre le Campo San Ramon et la saline Ponderosa, cette cuvette (dénommée «salt-pond E» par Vonder Haar, 1972, 1976) est à moins d'un kilomètre de la mer dont elle n'est séparée que par le cordon littoral (fig. 3). Le diverticule étudié a la forme d'une ellipse de 300 m x 100 m. Le profil a été réalisé sur 50 m de long depuis le pied de la dune jusqu'au centre de la structure (fig. 3). Reposant sur un substratum sableux, les dépôts évaporitiques, épais de 2 mètres au centre du bassin, sont constitués par du gypse recouvert par une fine croûte de halite. La surface de ce diverticule est très légèrement surélevée par rapport au plan d'eau du bassin principal dans lequel s'observent essentiellement des tapis algaires carbonatés.

C - DESCRIPTION DES SÉDIMENTS ÉVAPORITIQUES

1 - PROFIL DE LA SALINE OMETEPEC

Les sédiments évaporitiques, gypse et halite, ont été prélevés sur une épaisseur de 30 cm au maximum (fig. 4). Sous la couche de halite superficielle, les niveaux gypseux montrent un litage grossier déterminé par des variations de teinte et de granulométrie. L'horizon de gypse gris sombre à noir, riche en matière organique, situé sous la halite, passe à quelques centimètres de profondeur à des alternances de niveaux plus clairs. La taille des cristaux est variable, généralement millimétrique, les plus gros cristaux pouvant former des concrétions. L'habitus cristallin du gypse est le plus souvent celui de cristaux allongés ou de prismes trapus souvent maclés, formes caractéristiques d'une cristallisation sous-aquatique (Shearman, 1971).

L'anhydrite a été trouvée à environ 10 cm de profondeur dans la zone noyée, à 300 m du bord de la saline, au point de prélèvement O.4 (fig. 4). Elle se présente sous l'aspect d'une pâte

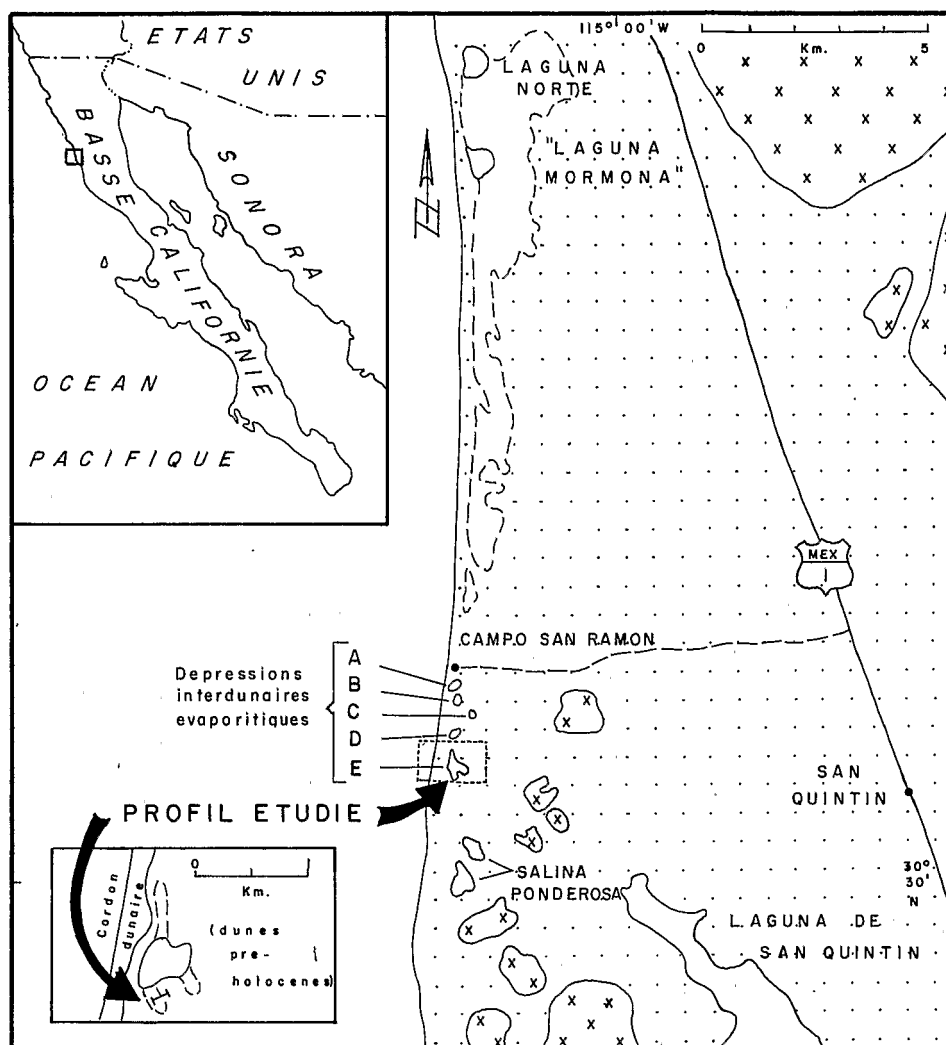


Fig. 3. — Complexe de la lagune Mormona : localisation de la zone étudiée.

blanche, en amas diffus infracentimétriques, au sein du sédiment gypseux ; les cristaux d'anhydrite ont une forme tabulaire et une taille moyenne de 50μ . La présence d'anhydrite à Ometepec avait déjà été signalée par D.J.J. Kinsman (1969) et G.P. Butler (1970), mais en position plus marginale et dans la zone capillaire. Ces auteurs présentent des interprétations différentes quant à l'origine de cette anhydrite ; d'après D.J.J. Kinsman, l'anhydrite se formerait par diagenèse précoce tandis que pour G.P. Butler, elle serait le produit de l'altération diagénétique du gypse par les saumures concentrées. Dans la coupe étudiée, l'apparition de l'anhydrite évoque davantage un développement précoce du minéral dans des saumures concentrées, comparable à celui décrit dans les sebkhas du Golfe Persique (Kinsman, 1966, 1969 ; Shearman, 1966).

A environ 15 cm de profondeur, au centre de la dépression, un banc gypso-halitique forme un horizon discontinu dont l'épaisseur n'excède pas 10 cm (fig. 4). Cette roche, constituée de halite primaire en chevrons, cimentée par de la halite claire (Shearman, 1970), se serait indurée à la faveur de ruptures momentanées des apports d'eau marine ; Smith, 1972).

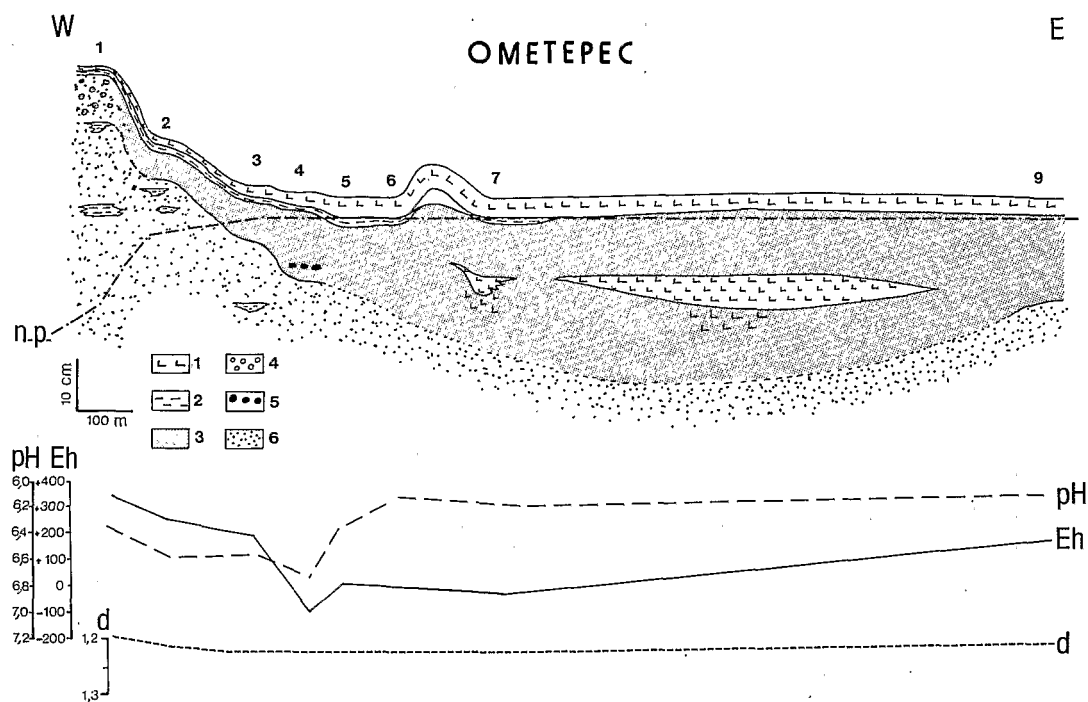


Fig. 4 - Coupe sédimentaire du profil étudié à la lagune Ometepec.

- 1 : Halite ; - 2 : Argiles ; - 3 : Gypse ; - 4 : Nodules de gypse ;
- 5 : Nodules d'anhydrite ; - 6 : Sables ; - n.p. : Niveau piézométrique.

2 - PROFIL ETUDIÉ AU SUD-EST DE LA LAGUNE OJO DE LIEBRE

Dans la zone étudiée, les minéraux évaporitiques se développent au sein d'un sédiment argilo-sableux sur une épaisseur de 30 cm au centre de la dépression (fig. 5).

La couche halitique superficielle, de quelques millimètres d'épaisseur, est limitée à la partie centrale du bassin ; de nombreuses figures de dissolution - recristallisation sont le signe de sa remobilisation au cours d'épisodes d'inondation, vraisemblablement d'origine météorique.

Au centre du bassin et à quelques centimètres de profondeur, apparaît un horizon discontinu de polyhalite ($\text{Ca}_2\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), en nodules blancs millimétriques associés à du gypse. De nombreux cristaux de gypse envahis par la polyhalite témoignent de l'origine diagénétique de ce minéral par remplacement du gypse, phénomène précédemment invoqué par W.T. Holser (1966).

Dans les niveaux gypseux sous-jacents, les cristaux en forme de lentilles, aplaties suivant l'axe c, indiquent une croissance diagénétique au sein d'un sédiment hôte (Shearman, 1971). Ces cristaux sont généralement millimétriques mais peuvent atteindre plusieurs centimètres et former des concrétions en rosettes dans les niveaux les plus profonds, baignés par la nappe de saumure.

3 - PROFIL ETUDIÉ AU SUD DU COMPLEXE DE LA LAGUNE MORMONA

Dans le diverticule de la dépression interdunaire étudiée, le profil réalisé montre la succession de niveaux gypseux de faciès variés sur une épaisseur maximale de 2 mètres au centre de la cuvette

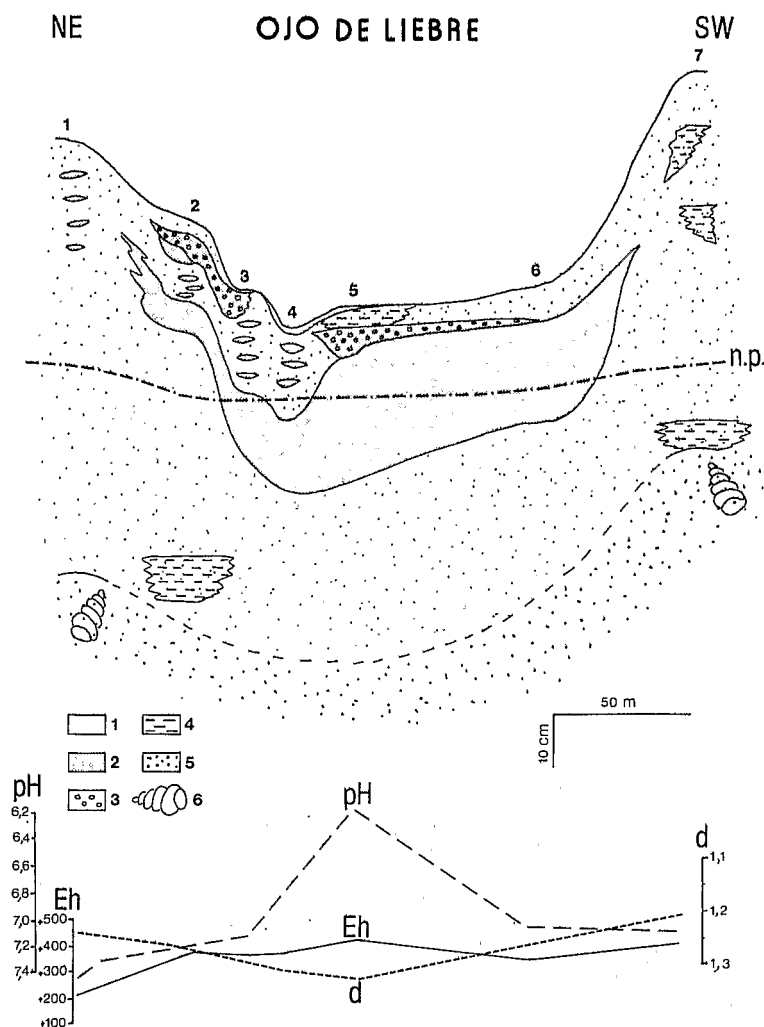


Fig. 5. — Coupe sédimentaire du profil étudié à la lagune Ojo de Liebre.

— 1 : Halite ; — 2 : Gypse ; — 3 : Nodules de polyhalite ; — 4 : Argiles ;
— 5 : Sables ; — 6 : Coquilles marines ; — n.p. : Niveau piézométrique.

(fig. 6). Une des particularités de ce bassin est le développement sur ses bordures de tapis algaires qui contribuent à d'importantes concentrations de matière organique.

La croûte millimétrique de halite superficielle n'est présente qu'au centre de la cuvette ; elle est largement recristallisée par suite des apports météoriques de surface.

Sous la halite, le premier niveau gypseux, d'épaisseur centimétrique, présente des strates colorées en saumon, vert, rose violacé, qui soulignent la présence de l'association algo-bactérienne typique des milieux sursalés.

Dans les horizons gypseux sous-jacents, les variations de teinte et de granulométrie définissent des strates plus ou moins régulières. Les cristaux, généralement de petite taille (100 μ à 1 mm), sont de forme lenticulaire et souvent corrodés ; ils peuvent former de petits agrégats mal consolidés. Comme à Ojo de Liebre, l'habitus cristallin du gypse caractérise une cristallisation diagénétique par déplacement d'un sédiment hôte.

Échantillon	t°C	d	pH	Eh (mV)	(Li ⁺) 10 ⁻⁶ m	(Mg ²⁺) 10 ⁻³ m	(K ⁺) 10 ⁻³ m	(Ca ²⁺) 10 ⁻³ m	(SO ₄ ²⁻) 10 ⁻³ m	(Na ⁺) m	(Cl ⁻) m	δ ¹⁸ O(H ₂ O) /SMOW	δ ² H(SO ₄) /SMOW	δ ¹⁸ O(SO ₄) /SMOW	δ ³⁴ S(SO ₄) /C.D.
O.1	24,5	1,203	6,4	+340	151,1	409,4	113,3	19,2	159,6	4,98	5,66	+5,1 +5,5*	+8,7	+19,6	+19,6
O.2	22	1,226	6,6	+255	241,2	668,8	165,4	12,5	258,2	5,14	6,21	+4,1 +4,8*	+8,0	+19,2	+19,2
O.3	24	1,232	6,6	+185	412,9	1001,5	200,6	8,9	364,4	4,30	6,57	+4,7 +5,8*	+7,5	+19,3	+19,3
O.4	24	1,231	6,7	-120	380,7	898,7	201,8	9,0	334,1	4,80	6,44	+5,1 +6,1*	-3,8 +3,2*	+7,9	+20,0
O.5	23	1,235	6,3	0	418,4	1034,9	223,1	9,1	386,8	4,84	6,63	+5,8 +6,9*	+7,5	+19,7	+19,7
O.6	33	1,244	6,1	-10	525,2	1249,0	255,1	7,9	454,0	4,49	6,52	+6,9 +8,1*	+7,6	+19,6	+19,6
O.7	33	1,234	6,2	-40	503,5	1241,8	248,0	10,6	466,3	4,39	6,69	+5,9 +7,1*	+7,3	+19,5	+19,5
O.9	30	1,242	6,1	+160	447,6	1022,0	237,5	14,0	392,0	4,31	6,75	+6,8 +7,7*	+7,3	+19,4	+19,4
O.12	25	1,250	6,5	-50	604,5	1451,2	295,8	9,2	530,3	3,97	6,62	+4,1 +5,7*	+7,1	+19,1	+19,1
L.0		1,110			72,0	47,6	17,4	16,8	231,6	2,79	2,39	-0,2	+11,3	+18,5	+18,5
L.1	23,5	1,126	7,5	+210	93,4	51,5	27,7	16,3	275,8	3,24	2,84	+0,5	+10,2	+18,1	+18,1
L.2	25	1,160	7,3	+370	101,2	65,5	34,6	13,0	347,8	4,18	3,62	+0,9 +1,0*	+10,1	+17,3	+17,3
L.3	26	1,182	7,2	+360	127,1	73,7	38,1	11,0	385,5	4,83	4,32	+0,9 +1,0*	+10,5	+18,3	+18,3
L.4	26	1,200	6,8	+370	221,0	577,4	157,2	9,4	416,4	4,74	5,13	+0,4 +1,0*	+9,5	+18,1	+18,1
L.5	25,5	1,218	6,2	+410	376,3	873,6	244,6	8,0	512,5	4,59	5,66	-0,1 +0,8*	+10	+19,0	+19,0
L.6	26,5	1,157	7,1	+330	142,1	169,0	56,1	13,7	343,6	4,02	3,68	+0,1 +0,3*	+9,5	+17,8	+17,8
L.7	23	1,100	7,2	+390	106,6	106,6	36,6	22,4	191,1	2,39	2,24	-0,6	+9,7	+17,4	+17,4
(L.8)		1,162	6,9	+350	104,1	66,2	35,6	15,2	346,0	4,34	3,89	+2,5	+9,8	+18,6	+18,6
M.17	28	1,213	6,9	-80	204,4	529,7	128,6	14,1	226,9	5,06	5,93	+3,1 +3,6*	-2,1 +2,1*	+10,9	+19,8
M.18	28	1,209	6,9	-80	184,6	467,1	116,4	15,7	200,7	4,99	5,68	+3,2 +3,7	+10,6	+19,7	+19,7
M.19	24	1,132	6,9	-100	135,3	279,5	75,0	30,3	129,6	3,22	3,51	+0,9 +1,2*	+11,5	+20,4	+20,4
M.20	25	1,100	7,5	+40	87,5	202,0	56,5	38,6	110	2,61	2,74	+0,3 +0,5*	+11,0	+20,1	+20,1
M.21	23	1,099	7,5	-10	85,2	192,3	55,1	39,6	102,7	2,29	2,51	+1,2 +1,4*	+11,0	+20,0	+20,0
M.22	21,5	1,033	8,1	+350	29,5	170,8	15,9	28,4	48,9	0,69	0,80	+1,3 -1,1*	+11,0	+20,3	+20,3
M.23	22	1,028	8,0	+380	44,2	152,6	12,3	25,0	44,2	0,53	0,63	-1,1 -1,0*	+10,5	+19,7	+19,7
(M.27)	20,7	1,165	6,8	+400	147,3	355	96,0	31,2	156,8	4,14	4,59	+5,5 +5,9*	+9,7	+19,6	+19,6

Tableau 2. — Données physico-chimiques, chimiques et isotopiques sur les saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Morrona (échantillons O, L et M). Le signe * indique les valeurs de δ¹⁸O corrigées d'après les équations de Z. Sofer et J.R. Gat (1972, 1975). Les concentrations chimiques sont exprimées en molarités (moles/kg eau). Les échantillons (L.8) et (M.27) correspondent à une eau affleurant à l'air libre.

Entre 10 et 20 cm de profondeur, apparaît un horizon discontinu qui correspond à un ancien tapis algaire gypsifié ; dans ce niveau à laminations millimétriques se développent deux lits de nodules gypseux blancs. Sous le tapis algaire gypsifié, les nodules de gypse se développent dans le gypse lenticulaire et se concentrent en strates. Les cristaux de gypse qui constituent ces nodules sont en forme de tablettes hexagonales ; ils sont caractérisés par l'absence de faces courbes, l'absence d'inclusions et une taille moyenne de 20μ . Ces nodules de gypse sont comparables à ceux qui apparaissent dans la zone capillaire des platiers évaporitiques de la lagune Norte (fig. 3) du complexe de Mormona (Vonder Haar, 1976) ; des structures nodulaires identiques ont été récemment décrites dans des sebkhas côtières d'Égypte (West *et al.*, 1979).

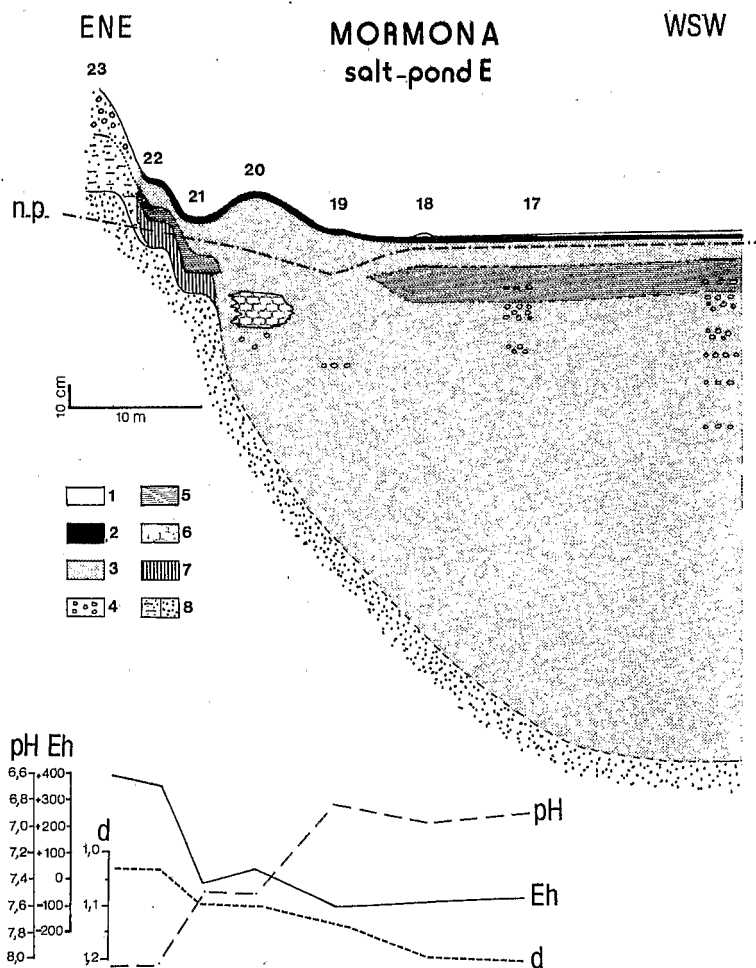


Fig. 6. — Coupe sédimentaire du profil étudié à la lagune Mormona (salt-pond E).

— 1 : Halite ; — 2 : Tapis algaire gypsifié superficiel ; — 3 : Gypse ; — 4 : Horizons de gypse nodulaire ; — 5 : Tapis algaire gypsifié enfoui ; — 6 : Carbonate ; — 7 : Tourbe ; — 8 : Sable et sable argileux ; — n.p. : Niveau piézométrique.

La présence en profondeur de ces faciès de sub-surface et du tapis algaire suggère une subsidence du bassin en réponse à la sédimentation évaporitique. Sur le rebord de la cuvette, un horizon de tourbe reposant sur le substratum sableux a été daté de 714 ± 60 ans B.P. Cet âge permet de

dater le début de fonctionnement du bassin évaporitique et d'évaluer le taux de sédimentation à 2,5 mm/an. Ce résultat est tout à fait comparable à l'estimation de 1000 ans, avancée par Vonder Haar (1976), pour la durée de fonctionnement de la lagune Mormona.

D – DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES DES SOLUTIONS

Les eaux analysées ont été prélevées dans les trous d'observation des profils et correspondent aux saumures interstitielles qui imprégnaient les sédiments de la zone saturée. Les mesures de densité, température, pH et potentiel d'oxydo-réduction ont été réalisées *in situ*.

1 – DENSITÉ ET TEMPÉRATURE

α – Ometepec (fig. 4 et tabl. 2).

Les températures, comprises entre 22 et 33°C, croissent vers le centre du bassin où la nappe est sub-affleurante. Les densités augmentent également de 1,200 à 1,250 depuis la marge W jusqu'au centre de la dépression

β – Ojo de Liebre (fig. 5 et tabl. 2).

Dans ce bassin, la nappe est relativement profonde (- 13 cm au centre) et la température de l'eau est pratiquement constante et voisine de 25°C. Les densités augmentent vers le centre de la structure et sont comprises entre 1,100 et 1,218.

γ – Mormona (fig. 6 et tabl. 2).

Les températures et les densités croissent vers le centre de la cuvette où la nappe est à 2 cm de profondeur ; la température varie entre 22 et 28°C et la densité entre 1,028 et 1,210.

2 – pH ET POTENTIEL D'OXYDO-RÉDUCTION

α – Ometepec (fig. 4).

Les saumures sont caractérisées par des pH légèrement acides, compris entre 6 et 6,7. Les potentiels d'oxydo-réduction sont positifs sur la marge continentale de la saline et deviennent négatifs au point de prélèvement O.4 où l'anhydrite a été observée. Dans ces saumures à potentiels d'oxydo-réduction négatifs, le caractère réducteur du milieu est également souligné par la présence d'hydrogène sulfuré libre qui est l'indice d'une réduction sulfato-bactérienne active.

β – Ojo de Liebre (fig. 5).

Le pH des saumures varie largement de 7,4 à 6,1 des marges vers le centre du bassin. Les potentiels d'oxydo-réduction très positifs (+ 350 mV en moyenne) caractérisent un milieu essentiellement oxydant.

γ — Mormona (fig. 6).

Le pH diminue régulièrement depuis les marges du bassin (pH = 8,0) jusqu'au centre de la dépression (pH = 6,9). Cette diminution de pH se corrèle avec l'augmentation de densité des solutions, c'est-à-dire avec une diminution de l'activité du liquide. Les potentiels d'oxydo-réduction, positifs sur la bordure, deviennent négatifs au centre de la cuvette. Comme à Ometepec, la présence d'hydrogène sulfuré libre dans ces saumures témoigne de l'activité bactérienne sulfato-réductrice.

3 — CHIMIE DES SAUMURES

Les larges variations observées dans les concentrations ioniques des saumures répondent à plusieurs effets dont l'enrichissement par évaporation et l'appauvrissement par cristallisation des sels sont les plus importants. Par ailleurs, des effets plus locaux peuvent intervenir : apport d'espèces ioniques par dissolution de phases minérales, soustraction d'ions par diagenèse minérale, dilution par des solutions peu concentrées.

L'effet de concentrations est aisément quantifiable si tant est que l'espèce ionique n'est pas impliquée dans l'élaboration d'une espèce minérale. Dans le cas de saumures marines concentrées, le lithium est l'espèce ionique répondant le mieux à cette condition (Fontes *et al.*, 1979). Il sera donc utilisé comme marqueur des conditions de concentration par évaporation.

Les principaux résultats analytiques sont reportés dans les figures 7 à 13 et dans le tableau 2.

α — (Li^+), (K^+), (Mg^+) (fig. 7, 8, 9 et tabl. 2).

Les concentrations en lithium, potassium et magnésium des eaux montrent des variations comparables et des évolutions différentes dans chacun des trois bassins étudiés.

L'augmentation des concentrations ioniques en fonction de la charge saline traduit l'effet dû à l'évaporation, l'eau la plus dense (O.12) étant concentrée d'environ 30 fois par rapport à l'eau de mer.

Dans la cuvette de Mormona, les concentrations en (Li^+) et (Mg^{2+}) des saumures les moins denses (M.22 et M.23) sont supérieures à celles d'eau de mer concentrée de salure identique. Il apparaît que ces eaux ne sont pas uniquement d'origine marine, mais résultent du mélange d'eau de mer évaporée et d'eau «douce» d'origine continentale.

Une telle diminution par des eaux météoriques est également mise en évidence à Ojo de Liebre où les concentrations en magnésium peuvent être inférieures à celle de l'eau de mer.

β — (Ca^{2+}) et (SO_4^{2-}) (fig. 10, 11 et tabl. 2).

Dans ces bassins évaporitiques où le gypse constitue la phase majeure des sels cristallisés, les variations de concentrations en (Ca^{2+}) et (SO_4^{2-}) dans les saumures illustrent principalement l'effet dû à la cristallisation du sulfate de calcium au cours du phénomène évaporitique. Cette évolution est particulièrement nette dans le cas des saumures d'Ometepec et de Mormona qui accusent une baisse brutale lorsque la densité atteint 1,100, valeur comparable à celle du point de saturation en gypse de l'eau de mer (Usiglio, 1849 ; Busson, 1974).

Le chimisme des eaux d'Ojo de Liebre apparaît beaucoup plus complexe ; en effet les concentrations en calcium sont environ deux fois plus faibles et celles en sulfate deux fois plus fortes en comparaison de celles des eaux de Mormona de salures identiques ; par contre, elles s'apparentent à celles des saumures d'Ometepec bien que leur charge saline soit inférieure. La possibilité d'une

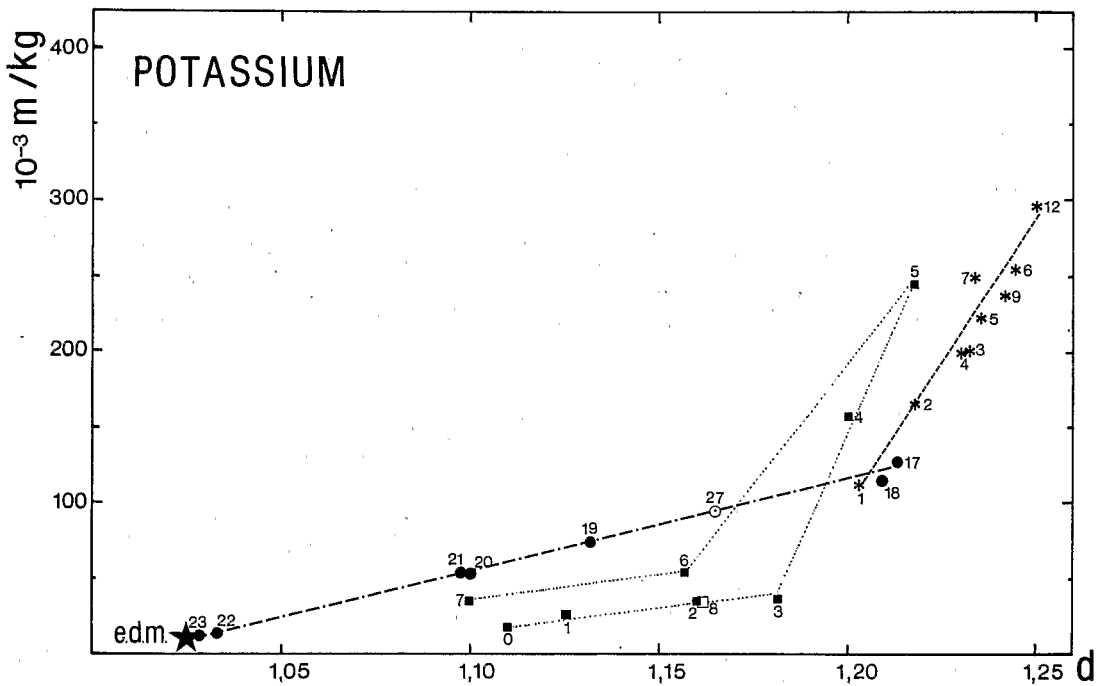
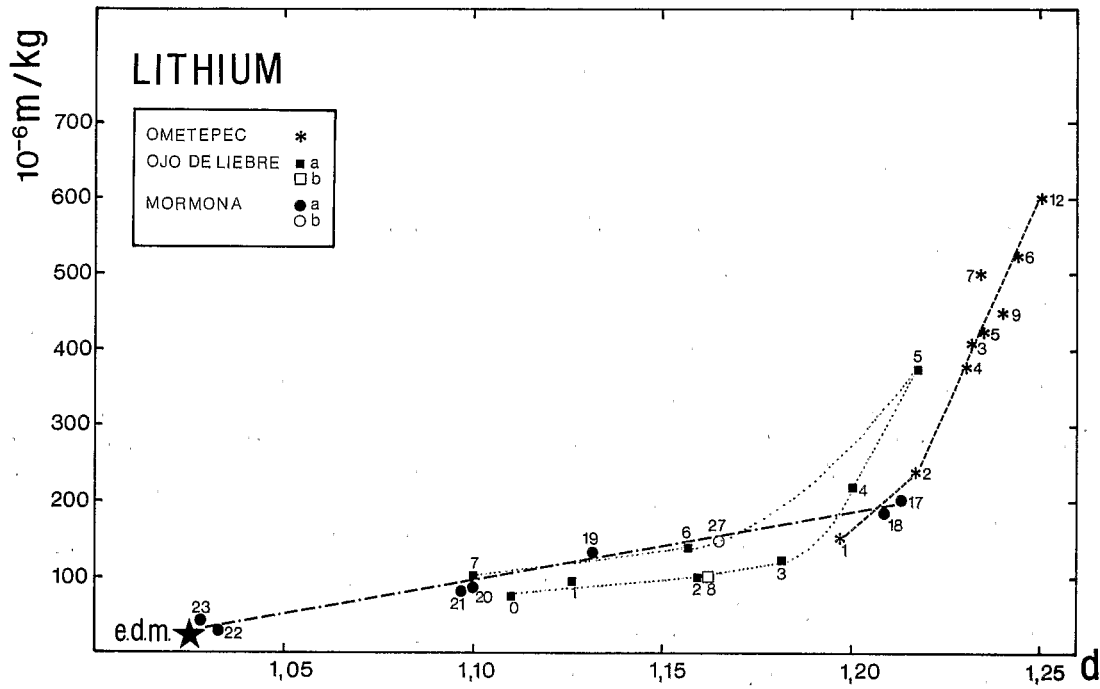


Fig. 7 (en haut) et 8 (en bas). — Évolution des concentrations en lithium et en potassium (exprimées en molalités), en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona.

Les figurés pleins (a) correspondent aux échantillons d'eaux interstitielles ; les figurés vides (b) correspondent aux échantillons d'eaux affleurant à l'air libre.

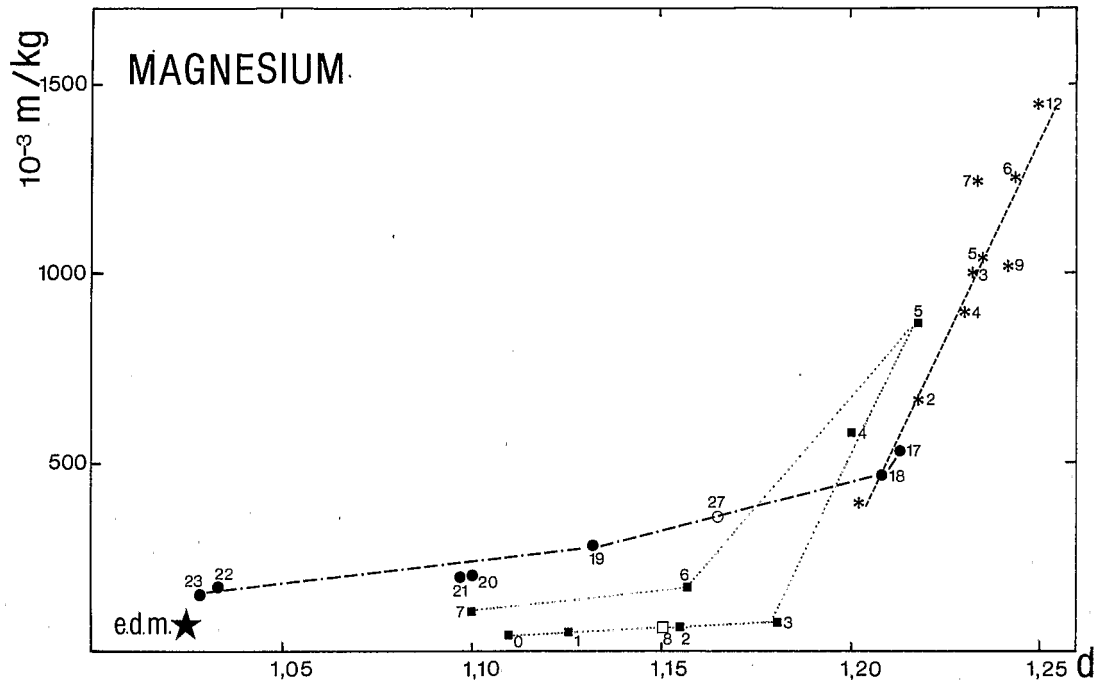


Fig. 9. — Evolution des concentrations en magnésium (exprimées en molalités), en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona.

Les figurés pleins (a) correspondent aux échantillons d'eaux interstieilles ; les figurés vides (b) correspondent aux échantillons d'eaux affleurant à l'air libre.

dilution de saumures marines denses par des eaux douces envisagée précédemment (ci-dessus, § α) semble bien être confirmée par ces résultats. La circulation de ces eaux continentales peut également être responsable de la dissolution partielle des minéraux sulfatés cristallisés antérieurement, ce qui rendrait compte en partie des fortes concentrations en sulfate observées dans ces saumures.

γ — (Na^+) et (Cl^-) (fig. 12, 13 et tabl. 2).

L'évolution des concentrations en (Na^+) et (Cl^-) au cours de l'évaporation de l'eau de mer traduit le degré de saturation des saumures vis-à-vis de la halite. Dans les bassins étudiés, ce minéral est largement représenté à Ometepec et présent uniquement au centre des cuvettes de Mormona et d'Ojo de Liebre. L'apparition de la halite se manifeste par une diminution brutale des concentrations en (Na^+) et une baisse plus progressive des teneurs en (Cl^-).

E — GÉOCHIMIE ISOTOPIQUE DES SAUMURES

L'intérêt d'une étude isotopique des saumures est multiple ; les variations isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène de l'eau permettent de déterminer l'origine de l'eau et son comportement vis-à-vis du phénomène évaporatoire ; les teneurs en oxygène 18 et soufre 34 de l'ion sulfate permettent de préciser l'origine de cet ion et son évolution dans le milieu de sédimentation.

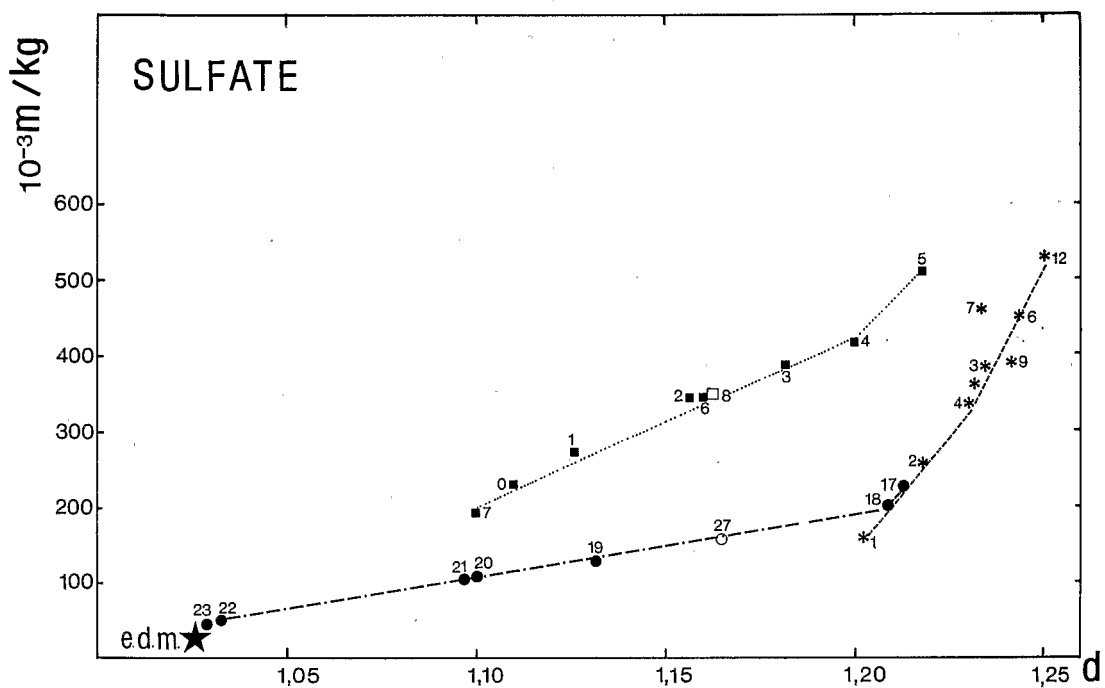
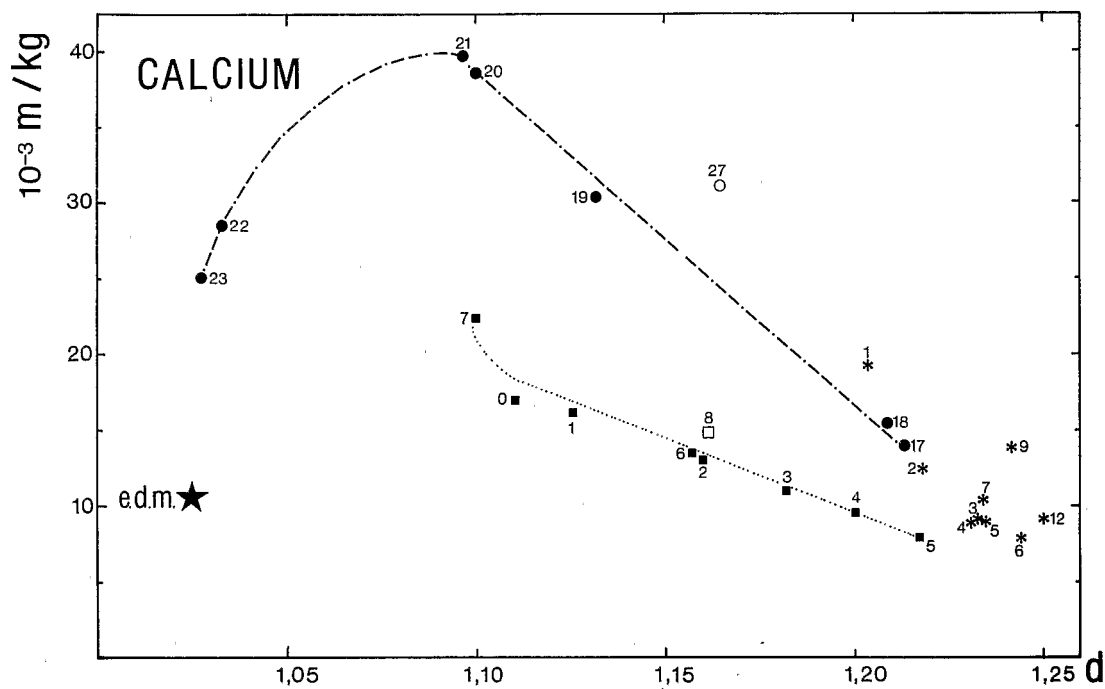


Fig. 10 (en haut) et 11 (en bas). — Évolution des concentrations en calcium et en sulfate (exprimées en molalités), en fonction de la densité, des saumures d'Omtepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona.

Les figurés pleins (a) correspondent aux échantillons d'eaux interstitielles ; les figurés vides (b) correspondent aux échantillons d'eaux affleurant à l'air libre.

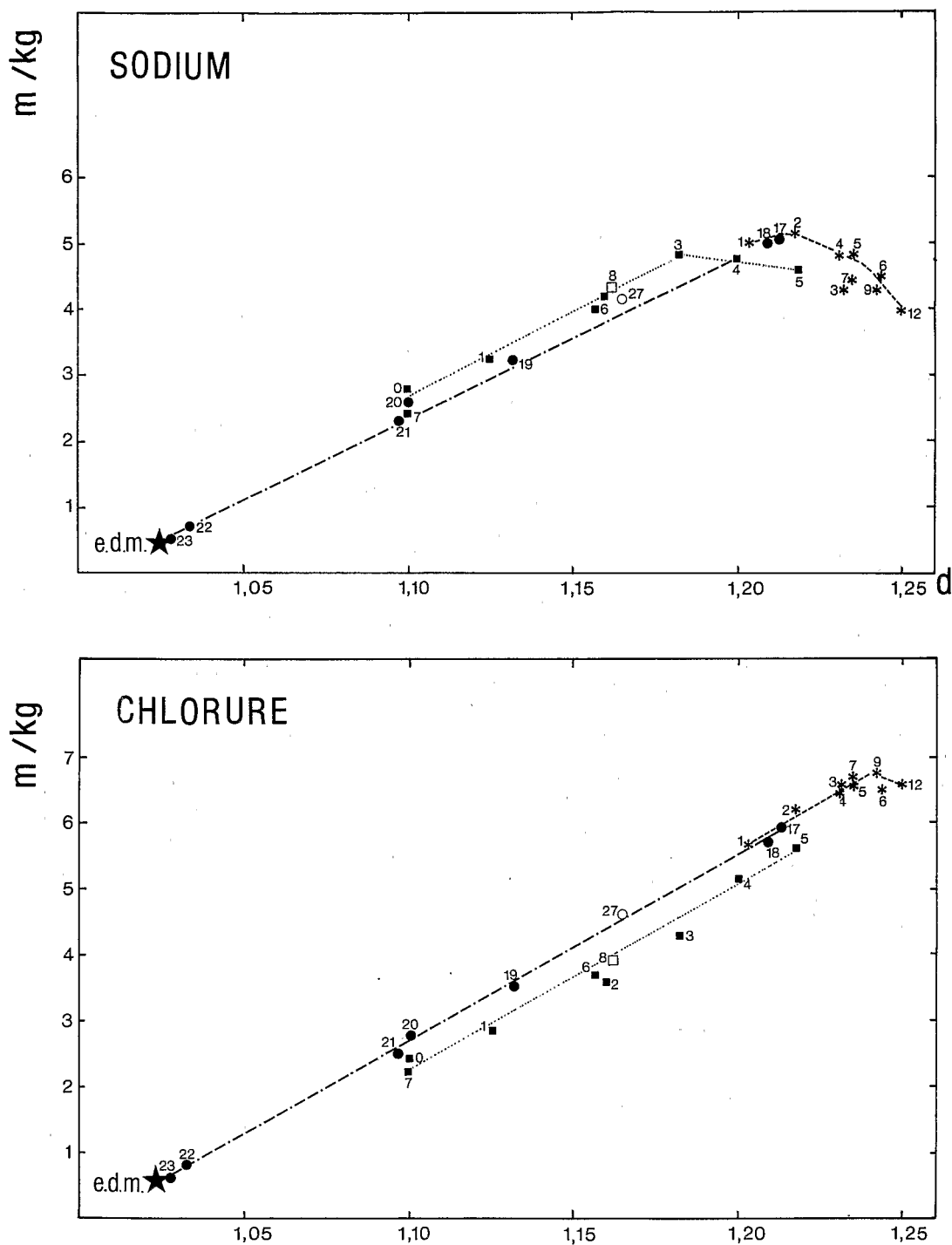


Fig. 12 (en haut) et 13 (en bas). — Évolution des concentrations en sodium et en chlorure (exprimées en molalités), en fonction de la densité, des saumures d'Ometepec, d'Ojo de Liebre et de Mormona.

Les figurés pleins (a) correspondent aux échantillons d'eaux interstitielles ; les figurés vides (b) correspondent aux échantillons d'eaux affleurant à l'air libre.

1 - COMPOSITIONS ISOTOPIQUES DE L'OXYGENE ET DE L'HYDROGENE DES EAUX

a - GÉNÉRALITÉS SUR LES VARIATIONS ISOTOPIQUES NATURELLES

Les changements de phase liquide - vapeur qui interviennent lors des processus d'évaporation et de condensation de l'eau sont responsables des variations isotopiques observées dans la nature. Le réservoir océanique, représentant 98 % de l'hydrosphère, est choisi comme référence (S.M.O.W.) ⁽¹⁾ et sa composition isotopique ⁽²⁾, δ , est égale à zéro par définition. Lorsqu'une masse d'eau est soumise à l'évaporation, les molécules d'eau à isotopes légers ont une tension de vapeur supérieure à celles des molécules à isotopes lourds ; par cet effet de distillation isotopique, la fraction restante de liquide est enrichie en isotopes lourds par rapport à la masse d'eau initiale. Il en résulte que les eaux marines évaporées se caractérisent par des valeurs de δ positives et que les valeurs de δ négatives sont spécifiques des eaux météoriques. Si l'on reporte les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène dans un même diagramme, les points représentatifs des eaux météoriques s'alignent sur une droite de pente 8 dont l'ordonnée à l'origine est généralement $\delta^2\text{H} = + 10$ (Craig, 1963) ; en revanche, les eaux évaporées, marines ou continentales, se placent sur des droites

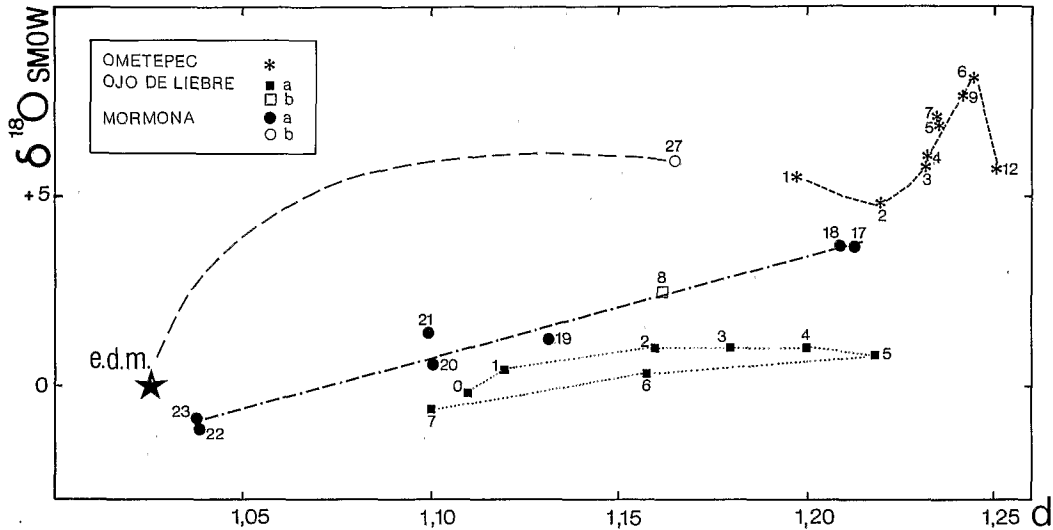


Fig. 14. - Relation entre la composition isotopique de l'oxygène et la densité des saumures d'Ometepec, Ojo de Liebre et Mormona.

Les figurés pleins (a) correspondent aux échantillons d'eaux interstitielles ; les figurés vides (b) correspondent aux échantillons d'eaux affleurant à l'air libre. Les compositions isotopiques de l'oxygène ont été corrigées de l'effet des ions en solution et sont exprimées sur une échelle de concentrations (Sofer et Gat, 1972). La courbe en tirets reliant les points représentatifs de l'échantillon M.27 et de l'eau de mer (e.d.m.) est extrapolée d'après les données de Fontes (1966) sur l'évaporation de l'eau de mer.

(1) S.M.O.W. : Standard Mean Ocean Water (Craig, 1961).

(2) $\delta = (R_e/R_r - 1)10^3$, où : - R = isotopes lourds/ isotopes légers ; - e : échantillon ; - r : référence. Les références utilisées sont : le S.M.O.W. pour ^{18}O et ^2H ; Cañon Diablo pour ^{34}S (Jensen et Nakai, 1962).

de pente variable et inférieure à 8 (Craig *et al.*, 1963 ; Lloyd, 1965). Au cours du processus évaporatoire, l'enrichissement isotopique du liquide est limité par l'échange isotopique avec la vapeur et par la charge saline de la solution (Craig *et al.*, 1963 ; Craig et Gordon, 1965 ; Gonfiantini, 1965 ; Fontes et Gonfiantini, 1967 ; Fontes, 1976) ; il augmente jusqu'à un maximum puis décroît pour des salures élevées (Gonfiantini, 1965 ; Fontes, 1966, 1976 ; Fontes et Gonfiantini, 1967 ; Sofer et Gat, 1975). Ainsi, les variations isotopiques enregistrées dans les eaux évaporées expriment pour l'essentiel des différences d'humidité de l'air et d'activité du liquide.

b - RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

Les compositions isotopiques de l'oxygène ont été corrigées de l'effet des sels en solution (Sofer et Gat, 1972) ; cette correction permet de replacer les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ sur une échelle de concentration et conduit à déterminer l'origine de l'eau des solutions.

Sur la figure 14, les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ sont reportées en fonction de la densité, paramètre exprimant la charge saline des solutions.

Deux échantillons, M.17 et O.4, ont fait l'objet d'une analyse isotopique de l'hydrogène. Sur la figure 15, les valeurs de $\delta^2\text{H}$ ont été corrigées (Sofer et Gat, 1975) pour exprimer les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène dans une même échelle d'activité ; cette forme d'expression permet de retracer l'évolution isotopique des solutions au cours du phénomène évaporatoire.

α - Ometepec (fig. 14, 15 et tabl. 2).

Les teneurs en ^{18}O des saumures augmentent assez régulièrement en fonction de la charge saline et atteignent des valeurs élevées (+ 5 à + 8 ‰). Les enrichissements isotopiques observés dans ces solutions saturées sont supérieurs à ceux des eaux libres des bassins salins (Fontes, 1966, 1976). Dans le cas de ces saumures de sub-surface s'évaporant par capillarité, des échanges isotopiques limités avec la vapeur permettent d'atteindre des enrichissements importants en ^{18}O . Un phénomène comparable a également été décrit dans des vases marines littorales (Jusserand *et al.*, 1979) et dans des colonnes expérimentales évaporantes (Gouvea da Silva Rosa, 1980).

Pour l'échantillon O.4, les basses teneurs en ^{18}O ($\delta^{18}\text{O} = + 6,1$ ‰) et en ^2H ($\delta^2\text{H} = + 3,2$ ‰) sont caractéristiques d'une saumure de faible activité (fig. 15).

β - Ojo de Liebre (fig. 14, tabl. 2).

Pour ces saumures, les teneurs en ^{18}O sont basses et montrent peu de variations ($- 0,7$ ‰ $< \delta^{18}\text{O} < + 1$ ‰). Les valeurs négatives de $\delta^{18}\text{O}$ rendent compte d'une dilution par des eaux d'origine météorique. La confrontation de ces résultats et des données hydrochimiques (§ D-3) permet de confirmer que ces saumures correspondent au mélange d'eaux marines concentrées et d'eaux continentales.

A l'échelle du bassin, les teneurs en oxygène 18 et en sels augmentent vers le centre de la cuvette. La fraction argileuse notable des sédiments et l'épaisseur importante de la zone non saturée sont certainement responsables d'une faible évaporation capillaire qui expliquerait l'amortissement de l'enrichissement isotopique observé pour ces saumures interstitielles. En revanche, la nappe affleurant à l'air libre dans une excavation en bordure du bassin (échantillon L.8 prélevé à proximité des points L.0 et L.1) est enrichie de 1,5 ‰ en oxygène 18 par rapport aux saumures interstitielles de salure identique.

γ - Mormona (fig. 14).

Les compositions isotopiques de l'oxygène des saumures interstitielles augmentent linéairement en fonction de la densité de - 1,1 à + 3,6 ‰. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ négatives sont la marque d'une importante dilution par des eaux d'origine météorique. Cette conclusion rejoint celle avancée sur la base des résultats hydrochimiques (§ D-3). Les faibles teneurs en ^{18}O ($\delta^{18}\text{O} = + 3,6$ ‰) et en ^2H ($\delta^2\text{H} = + 2,1$ ‰) de la saumure M.17 (fig. 15), résultent d'une part de la faible activité du liquide et d'autre part de la contribution notable d'eau continentale déficitaire en isotopes lourds.

Dans le bassin en eau adjacent, un échantillon (M.27) a été prélevé pour comparaison ; sa teneur en oxygène 18 (+ 5,9 ‰) correspond bien à celle d'une eau de mer évaporée.

Il apparaît ainsi que, dans la cuvette étudiée, les saumures interstitielles résultent du mélange de saumures marines en provenance du bassin de concentration adjacent et d'eaux météoriques, ce mélange étant soumis *in situ* à l'évaporation capillaire.

2 - ISOTOPES DE L'OXYGÈNE ET DU SOUFRE DU SULFATE AQUEUX

a - GÉNÉRALITÉS SUR LES VARIATIONS ISOTOPIQUES NATURELLES

Les variations isotopiques de l'oxygène et du soufre du sulfate sont dues principalement à deux effets qui peuvent se conjuguer (Pierre et Fontes, 1979). Le premier effet fait intervenir les changements de phase liquide - solide au cours des phénomènes de cristallisation et de dissolution. Le deuxième effet intervient au cours des réactions d'oxydo-réduction des espèces soufrées dans des milieux à activité sulfato-bactérienne. En l'absence de ces deux effets, les teneurs en oxygène 18 et en soufre 34 du sulfate océanique aqueux sont constantes (+ 9,7 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$: Longinelli et Craig, 1967 ; + 20 ‰ pour $\delta^{34}\text{S}$: Ault et Kulp, 1959 ; Thode *et al.*, 1961).

b - RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

 α - Ometepec (fig. 16 et tabl. 2).

Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{34}\text{S}$ du sulfate dissous des saumures sont inférieures à celles du sulfate marin (+ 7 ‰ < $\delta^{18}\text{O}$ < + 8,7 ‰ ; + 19,1 ‰ < $\delta^{34}\text{S}$ < + 20 ‰) et montrent une évolution à l'échelle du bassin.

Sur les marges de la saline où le milieu est oxydant (§ D-2- α), les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{34}\text{S}$ diminuent progressivement en direction du centre du bassin. Cette baisse des teneurs en isotopes lourds exprime l'appauvrissement du stock sulfaté par cristallisation de gypse à partir d'une quantité finie de sulfate marin. Cet effet «réservoir» est généralement peu sensible dans la nature, puisque seulement un quart du sulfate disponible est utilisé pour la cristallisation du gypse à partir de l'eau de mer (1). Toutefois, à Ometepec, cet effet est amplifié par le mode d'alimentation en eau marine particulier à ce bassin. En effet, chaque nouvelle inondation marine permet le mélange d'eau de mer chargée en calcium et des saumures résiduelles concentrées en sulfate qui conduit rapidement à la saturation en gypse (Smith, 1972).

(1) L'effet dû à la cristallisation de sulfate solide s'exprime par une équation de type distillation de Rayleigh :

$$\delta - \delta_0 = - \epsilon \cdot \ln f$$

où : - δ et δ_0 représentent respectivement les compositions isotopiques du sulfate aqueux final et du sulfate aqueux initial ; - ϵ correspond au facteur d'enrichissement à la cristallisation ($\epsilon^{18}\text{O} = - 3,5$, $\epsilon^{34}\text{S} = - 1,65$ pour le gypse : Lloyd, 1968 ; Thode et Monster, 1965) ; - f est la fraction de sulfate aqueux résiduel.

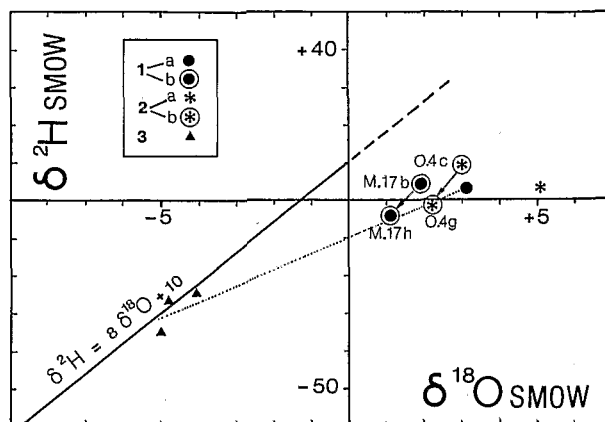


Fig. 15. — Relation $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ des saumures interstitielles (1a et 2a) de Mormona (M.17) et d'Ometepec (O.4), et des eaux «mères» des gypses (1b et 2b) de Mormona (M.17b et M.17h) et d'Ometepec (O.4c et O.4g).

Les valeurs moyennes annuelles des précipitations à Santa Maria, Californie, U.S.A. (3) sont données à titre de comparaison (données I.A.E.A., 1972-1975). Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène des saumures interstitielles sont exprimées dans une même échelle d'activités (Sofer et Gat, 1975). Les flèches représentent l'évolution isotopique des eaux «mères» des gypses dans un même profil vertical. La droite de mélange hypothétique en pointillés reliant les points représentatifs des eaux «mères» des gypses M.17h, O.4g, de la saumure M.17, et recoupant la droite des eaux météoriques, souligne d'une part l'effet de recristallisation diagénétique des gypses en présence d'eaux d'origine météorique et d'autre part la dilution probable de saumure marine par des eaux douces dans le cas de la solution M.17.

Au point de prélèvement O.4 où le milieu devient réducteur (§ D-2- α), l'augmentation des teneurs en isotopes lourds correspond à une réduction partielle du sulfate par les bactéries.

Vers le centre du bassin, les teneurs en ^{18}O et ^{34}S du sulfate décroissent ; leur évolution résulte de l'interférence de l'effet dû à la réduction sulfato-bactérienne et de l'effet «réservoir» dû à la cristallisation du gypse, ce dernier phénomène étant prépondérant.

β — Ojo de Liebre (fig. 16 et tabl. 2).

Les teneurs en soufre 34 du sulfate des saumures ($+17,3 < \delta^{34}\text{S} < +19$) sont inférieures de plus de 1 ‰ à celle du sulfate océanique. Elles sont tout à fait comparables aux valeurs données par Holser et Kaplan (1966) pour des saumures interstitielles prélevées dans d'autres platiers évaporitiques de la région d'Ojo de Liebre. Dans ce milieu à caractère oxydant (§ D-2- β), les effets bactériens de réduction sulfatée n'interviennent pas et ceux qui sont dûs à la cristallisation et à la dissolution du sulfate solide sont les seuls possibles.

Les compositions isotopiques de l'oxygène des eaux ont permis de montrer que ces saumures correspondent à un mélange d'eaux marines concentrées et d'eaux d'origine météorique. Par ailleurs, les concentrations en sulfate anormalement élevées sont interprétées comme la marque d'une importante dissolution par les eaux continentales des dépôts sulfatés cristallisés antérieurement (§ D-3).

Si la dissolution est totale, les compositions isotopiques du sulfate en solution seront égales à celles du sulfate solide initial. Par contre, si la dissolution est un phénomène partiel et pluriphasé faisant appel à des stades successifs de dissolution - recristallisation (Pierre et Fontes, 1979), de larges ségrégations isotopiques apparaîtront entre les phases sulfatées aqueuses et solides finales et le sulfate solide initial, le sulfate dissous étant appauvri en isotopes lourds par rapport aux phases solides. Une telle évolution permet de rendre compte des basses teneurs en soufre 34 du sulfate des saumures ; toutefois, les valeurs élevées de $\delta^{18}\text{O}$ ($+9,5 < \delta^{18}\text{O} < +11,3$) ne peuvent pas s'expliquer par ce phénomène et permettent de montrer que l'origine du sulfate est double.

Si l'on prend en compte un simple effet de cristallisation (§ E-2-b- α), la saumure sulfatée dont les compositions isotopiques de l'oxygène et du soufre seraient respectivement égales à +10 et +18,5 représenterait la fraction résiduelle ($f = 0,4$) d'un sulfate initial ($\delta^{34}\text{S} = +20$) dont la composition isotopique de l'oxygène serait égale à +13. Cette valeur élevée de $\delta^{18}\text{O}$ pourrait être celle d'un sulfate évolué au cours de phases successives d'oxydo-réduction selon un cycle comparable à celui évoqué dans les marais salants du Sud de la France (Fontes et Pierre, 1978). Une telle évolution isotopique s'applique uniquement au cas d'un bassin évaporitique dans lequel le milieu aqueux oxydant et le sédiment de fond réducteur permettent le changement de valence des espèces soufrées entre l'eau libre et l'eau interstitielle ; elle ne peut donc pas être invoquée *in situ* dans le bassin étudié dont le caractère est oxydant. La saumure «mère» des saumures analysées proviendrait des bassins périphériques où les sédiments de fond sont réducteurs.

Ainsi, la complexité de l'évolution des teneurs en ^{18}O et ^{34}S du sulfate des saumures d'Ojo de Liebre apparaît comme le reflet de la dualité d'origine (marine et continentale) des solutions et de la diagenèse qui s'exprime par des successions d'épisodes de dissolution et de recristallisation des sulfates solides.

γ - Mormona (fig. 16, tabl. 2).

Les compositions isotopiques de l'oxygène et du soufre des sulfates montrent peu de variations. Les valeurs de $\delta^{34}\text{S}$ sont voisines de +20 ‰ et rendent compte de l'origine essentiellement marine de l'ion sulfate. Les teneurs en ^{18}O ($+10,5 \text{ ‰} < \delta^{18}\text{O} < +11,5 \text{ ‰}$) sont supérieures à celle du sulfate marin. En revanche, le sulfate de l'eau du bassin adjacent est parfaitement représentatif du sulfate océanique ($\delta^{18}\text{O} = +9,7 \text{ ‰}$, $\delta^{34}\text{S} = +19,6 \text{ ‰}$).

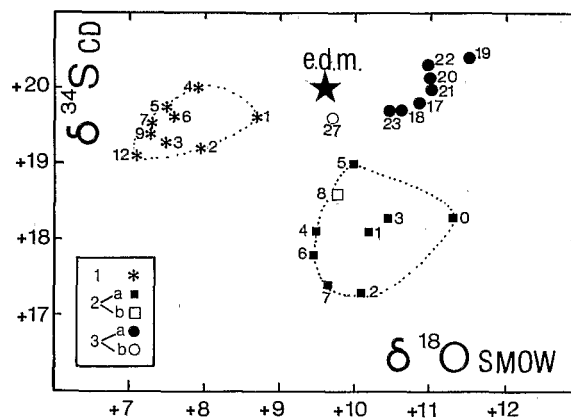


Fig. 16. — Relation $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{34}\text{S}$ du sulfate aqueux des saumures interstitielles (figurés pleins, a) et des saumures affleurant à l'air libre (figurés vides, b) à Ometepec (1), Ojo de Liebre (2) et Mormona (3).

L'enrichissement isotopique enregistré dans le sulfate des saumures interstitielles est la conséquence de la réduction sulfato-bactérienne (§ D-2-γ) qui se manifeste dans la cuvette évaporitique.

Par ailleurs, l'effet dû à la cristallisation du gypse n'est pas sensible, ce qui implique que la perte de sulfate par cristallisation est compensée par un apport continu en ion sulfate.

F — DONNÉES ISOTOPIQUES SUR LES GYPSES

Les informations apportées par l'analyse des saumures sont représentatives de la période de prélèvement, tandis que l'étude des sédiments permet de retracer l'évolution dans le temps des conditions du milieu de sédimentation.

Le matériel sédimentaire des coupes O.4 d'Ometepec, et M.17 de Mormona a fait l'objet d'analyses isotopiques qui ont porté, d'une part, sur l'oxygène et le soufre du sulfate des gypses et, d'autre part, sur l'oxygène et l'hydrogène de l'eau de cristallisation des gypses ⁽¹⁾. Ces différents paramètres isotopiques précisent l'origine de l'ion sulfate et celle de l'eau du milieu de cristallisation des gypses.

1 — OMETEPEC

La coupe étudiée (O.4), d'environ 15. cm d'épaisseur, a fait l'objet de quatre séries de mesures.

a — EAUX DE CRISTALLISATION DES GYPSES

Les compositions isotopiques de l'oxygène des eaux «mères» des gypses (*i.e.* corrigées du fractionnement isotopique à la cristallisation) ont des valeurs voisines de + 3 ‰, constantes dans les dix centimètres supérieurs, et enregistrent une baisse de 0,8 ‰ à 14 cm de profondeur (fig. 15 et 17). Ces gypses ne sont pas en équilibre isotopique avec la saumure interstitielle dont la valeur de $\delta^{18}\text{O}$ est égale à + 6 ‰. Par ailleurs, les teneurs en ^{18}O des eaux «mères» de ces gypses sont inférieures de 3 à 4 ‰ par rapport à celles de gypses de précipitation directe (gypses des marais salants du Sud de la France : Fontes, 1965). En fait, dans ce bassin, la saturation en gypse est rapidement atteinte par suite du mélange des saumures résiduelles et de l'eau de mer ; les teneurs en isotopes lourds de l'eau dans laquelle ce gypse cristallise sont donc nécessairement inférieures à celles d'une eau de mer saturée en gypse par simple évaporation comme dans le cas des marais salants.

Dans le diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ (fig. 15), le point représentatif de l'eau «mère» du gypse de surface O.4c peut être placé, soit sur une droite de mélange d'eau marine évaporée et d'eau météorique, soit sur une droite d'évaporation d'eau marine passant par le S.M.O.W. Aucune dilution d'origine météorique n'ayant été mise en évidence à Ometepec, la deuxième interprétation peut être retenue et indique que ce gypse a cristallisé dans une eau d'origine essentiellement marine. En revanche, le point correspondant à l'eau «mère» du gypse O.4g, situé à 14 cm de profondeur, ne semble pas se placer sur une droite passant par le S.M.O.W. et se situe plus vraisemblablement sur une droite recoupant la droite des eaux météoriques ; ce résultat montre qu'une partie de l'eau intégrée au

(1) Au cours de la cristallisation du gypse, l'enrichissement isotopique qui intervient entre l'eau du milieu où le gypse cristallise (eau «mère») et l'eau intégrée au réseau cristallin du gypse (eau de cristallisation) est de + 4 ‰ en oxygène 18 (Gonfiantini et Fontes, 1963) et de - 16 ‰ en deutérium (Fontes et Gonfiantini, 1967).

réseau cristallin du gypse est d'origine météorique. Cette diagenèse sulfatée discrète est probablement induite par des circulations d'eaux souterraines et souligne que même dans cet environnement essentiellement marin, les influences continentales ne sont pas négligeables.

b - OXYGENE 18 ET SOUFRE 34 DU SULFATE

Les enrichissements isotopiques observés entre le sulfate aqueux et le gypse de surface O.4c sont de 3,4 ‰ pour l'oxygène 18 et de 1,7 ‰ pour le soufre 34 (fig. 17) ; ces valeurs, identiques à celles de la littérature (Lloyd, 1968 ; Thode et Monster, 1965), confirment que ce gypse a cristallisé à partir du sulfate de la saumure.

Dans les gypses sous-jacents, les teneurs en isotopes lourds du sulfate diminuent de 1,3 ‰ en ^{34}S et de 0,8 ‰ en ^{18}O . Ces variations isotopiques sont l'expression de conditions réductrices plus intenses en surface ; l'augmentation de la valeur de $\delta^{18}\text{O}$ du sulfate du gypse le plus profond (O.4g) est vraisemblablement à mettre en relation avec la recristallisation décelée à ce niveau (§ F-1-a).

2 - MORMONA

La coupe M.17, localisée au centre de la cuvette, a été étudiée sur une épaisseur de 70 cm. Le gypse présente d'importantes variations de faciès et les recristallisations diagénétiques sont fréquentes et intenses en profondeur.

a - EAUX DE CRISTALLISATION DES GYPSES

Les compositions isotopiques de l'oxygène des eaux «mères» des gypses ont des valeurs proches de + 2 ‰ et constantes jusqu'à 12 cm de profondeur (fig. 15 et 18) ; elles diminuent progressivement sous le tapis algair gypsifié jusqu'à une valeur de + 0,3 ‰ à 70 cm de profondeur. Comme dans le cas de la coupe 4 d'Ometepec, les eaux «mères» des gypses superficiels sont appauvries en isotopes lourds par rapport à la saumure interstitielle ($\delta^{18}\text{O} = + 3,6$ ‰), ce qui implique que soit les gypses ont recristallisé partiellement en présence d'eaux météoriques, soit que la saumure interstitielle a subi une évaporation postérieure à la cristallisation du gypse, soit l'intervention conjuguée de ces deux effets. Replacé dans le diagramme $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ (fig. 15), le point représentatif de l'eau «mère» du gypse de surface M.17b, se situe soit sur une droite d'évaporation d'eau marine passant par le S.M.O.W., soit sur une droite de mélange d'eau de mer évaporée et d'eau météorique. Les conclusions tirées de l'analyse isotopique de l'oxygène de l'eau des saumures (§ E-1-b- γ) conduisent à choisir la deuxième hypothèse. L'intégration d'eau d'origine météorique dans le réseau cristallin du gypse est particulièrement nette dans le cas de l'échantillon M.17h prélevé à 35 cm de profondeur.

b - OXYGENE 18 ET SOUFRE 34 DU SULFATE

Les teneurs en ^{18}O et ^{34}S du sulfate des gypses fluctuent largement au long de la colonne sédimentaire (+ 13,3 ‰ < $\delta^{18}\text{O}$ < + 15,3 ‰ ; + 19,4 ‰ < ^{34}S < + 21,1 ‰) et permettent de définir trois épisodes dans l'évolution du milieu de sédimentation (fig. 18).

Dans les dix centimètres supérieurs, c'est-à-dire au-dessus du tapis algair gypsifié, les teneurs en isotopes lourds du sulfate solide sont stables ($\delta^{18}\text{O} = + 13,7$ ‰ ; $\delta^{34}\text{S} = + 20,7$ ‰). Les valeurs

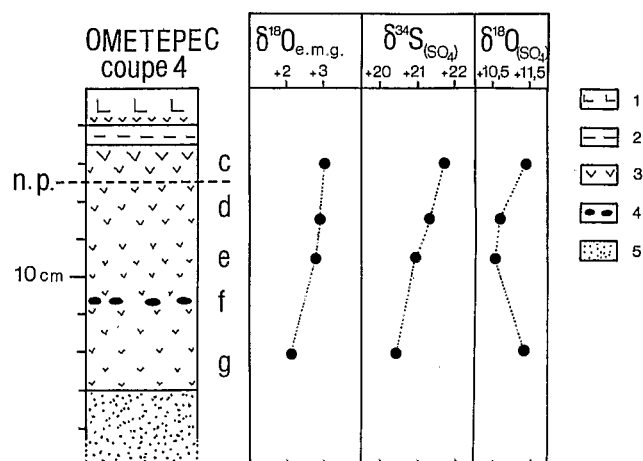


Fig. 17. — Compositions isotopiques de l'oxygène (vs. S.M.O.W.) des eaux «mères» des gypses, et du soufre (vs. C.D.) et de l'oxygène (vs. S.M.O.W.) du sulfate des gypses dans la coupe 4 d'Ometepec.

— 1 : Halite ; — 2 : Argile ; — 3 : Gypse ; — 4 : Nodules d'anhydrite ; — 5 : Sable ; — n.p. : Niveau piézométrique.

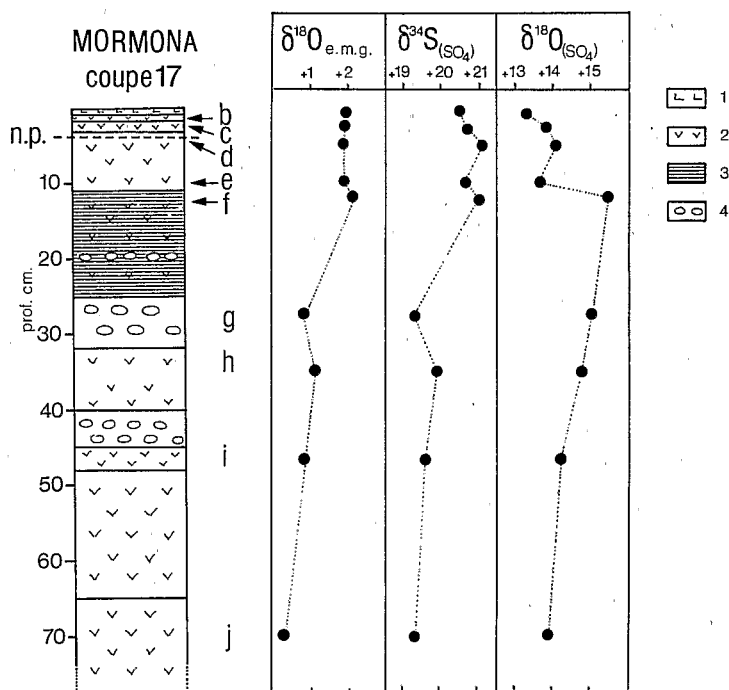


Fig. 18. — Compositions isotopiques de l'oxygène (vs. S.M.O.W.) des eaux «mères» des gypses, et du soufre (vs. C.D.) et de l'oxygène (vs. S.M.O.W.) du sulfate des gypses dans la coupe 17 de Mormona.

— 1 : Halite ; — 2 : Gypse ; — 3 : Tapis algairé gypsifié enfoui ; — 4 : Horizons nodulaires de gypse ; — n.p. : Niveau piézométrique.

d'enrichissements observées entre les sulfates aqueux et solide ($^{18}\text{O} = 2,3 \text{ ‰}$, $^{34}\text{S} = 0,9 \text{ ‰}$) sont légèrement inférieures à celles obtenues à Ometepec et indiquent que ces gypses ne sont apparemment pas en équilibre isotopique avec le sulfate dissous de la saumure. En fait, la réduction sulfato-bactérienne qui s'exprime dans le milieu aqueux conduit à une augmentation des teneurs en isotopes lourds dans le sulfate aqueux résiduel et les valeurs d'enrichissements mesurées ne correspondent pas aux valeurs réelles de l'équilibre.

Au niveau du tapis algaire gypsifié, la valeur de $\delta^{18}\text{O}$ augmente brutalement d'environ 2 ‰ ; cet enrichissement isotopique exprime une intensification de l'activité bactérienne sulfato-réductrice justifiée par l'abondance de matériel organique algaire disponible.

Sous le tapis algaire, les teneurs en soufre 34 diminuent brutalement de plus de 1 ‰ tandis que les teneurs en oxygène 18 décroissent graduellement. Ces variations isotopiques sont justifiées par la diagenèse qui affecte ces niveaux et fait intervenir des phases successives de dissolution et recristallisation sous l'influence des eaux météoriques. Cette interprétation rejoint les conclusions tirées de l'étude isotopique des eaux de cristallisation des gypses (§ F-2-a).

G – CONCLUSIONS

L'étude sédimentologique et géochimique entreprise sur les saumures et les évaporites des zones supratidales des trois lagunes évaporitiques de Basse Californie permet de préciser les modalités d'alimentation en eaux marine et continentale de ces bassins et leur évolution dans des contextes sédimentaires différents.

Dans la saline Ometepec, l'alimentation en eau est essentiellement d'origine marine ; toutefois, à quelques centimètres de profondeur, la recristallisation partielle du gypse en présence d'eau météorique est liée à des circulations souterraines d'eaux continentales. Les variations isotopiques enregistrées dans les sulfates expriment la conjonction de deux effets ; le caractère généralement réducteur du milieu s'accompagne d'une réduction bactérienne partielle du sulfate ; les apports intermittents en eau marine et leur mélange avec les saumures résiduelles concentrées en sulfate favorisent la cristallisation du gypse et conduisent à une évolution isotopique du sulfate par effet «réservoir».

Dans la zone étudiée au Sud Est de la lagune Ojo de Liebre, les solutions interstitielles correspondent à un mélange de saumures marines concentrées dans le bassin adjacent et d'eau d'origine météorique. Dans ce bassin de caractère oxydant, l'évolution isotopique des sulfates et la diagenèse sulfatée sont essentiellement conditionnées par les réactions de dissolution - recristallisation des minéraux sulfatés. L'origine de l'ion sulfate apparaît double : une partie correspond à un sulfate marin évolué au cours d'un cycle d'oxydo-réduction dans le bassin périphérique, l'autre partie résulte de la dissolution par les eaux continentales des dépôts sulfatés cristallisés antérieurement.

Dans le bassin étudié au Sud du complexe de la lagune Mormona, les eaux interstitielles résultent du mélange de saumure provenant du bassin de concentration adjacent et d'eau d'origine météorique. Ces apports d'eaux continentales sont responsables de la diagenèse gypseuse qui s'exprime par des dissolutions et recristallisations décelées tant dans les faciès des gypses que dans les compositions isotopiques. L'origine de l'ion sulfate est essentiellement marine. Comme dans le cas de la saline Ometepec, l'activité sulfato-bactérienne est effective au centre de la cuvette où le milieu est réducteur. L'absence d'effet isotopique de «réservoir» par cristallisation de gypse permet de montrer que les apports en eau marine sont permanents.

Remerciements. — La mission de terrain a été réalisée grâce au support financier de l'Universidad Nacional Autónoma de Mexico, de l'O.R.S.T.O.M. et du C.N.R.S. (A.T.P. I.P.O.D. et R.C.P. 459). Les auteurs remercient M.

l'Ingénieur Diego Cordoba, Directeur de l'Instituto de Geologia de l'U.N.A.M. et M. Georges Busson, Sous-Directeur du Laboratoire de Géologie du Muséum national d'Histoire naturelle de Paris, pour leur soutien dans la réalisation de ce travail. Les analyses hydrochimiques ont été réalisées par les Services scientifiques centraux de l'O.R.S.T.O.M., au Laboratoire de M. Maurice Pinta. L'analyse de carbone 14 a été effectuée au Laboratoire de Géologie Dynamique par M. Jean-François Saliège ; les analyses de deutérium ont été réalisées au Département de Physico-chimie du C.E.A. dirigé par Mme Liliane Merlivat.

Par ses critiques constructives, M. Jean-Charles Fontes, Professeur à l'Université d'Orsay, nous a permis d'élaborer la version définitive de ce manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- AULT W.U. and KULP J.L. (1959). — Isotope geochemistry of sulfur. *Geochem. Cosmochem. Acta*, 16, pp. 201-235.
- BUSSON G. (1974). — Sur les évaporites marines : sites actuels ou récents des dépôts d'évaporites et leur transposition dans les séries du passé. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, 2, XVI, 2, pp. 189-208.
- BUTLER G.P. (1970). — Secondary anhydrite from a sabkha, Northwest Gulf of California, Mexico. *In* : Third Symposium on Salt, Cleveland (Ohio), *Northern Ohio Geol. Soc.*, pp. 153-155.
- CRAIG H. (1961). — Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen 18 in natural waters. *Science*, 133, pp. 1833-1834.
- CRAIG H., GORDON L.I. and HORIBE Y. (1963). — Isotopic exchange effects in the evaporation of water. *J. Geophys. Res.*, 68, 17, pp. 5079-5087.
- CRAIG H. and GORDON L.I. (1965). — Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and marine atmosphere. *In* : Stable isotopes in oceanographic Studies and Paleotemperatures, C.N.R., Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa, pp. 9-130.
- FONTES J.-C. (1966). — Intérêt en géologie d'une étude isotopique de l'évaporation. Cas de l'eau de mer. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 263, D, pp. 1950-1953.
- FONTES J.-C. (1976). — Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles : quelques aspects. Thèse Science, Paris.
- FONTES J.-C. et GONFIANTINI R. (1967). — Fractionnement isotopique de l'hydrogène dans l'eau de cristallisation du gypse. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 265, D, pp. 4-6.
- FONTES J.-C. et GONFIANTINI R. (1967). — Comportement isotopique au cours de l'évaporation de deux bassins sahariens. *E.P.S.L.*, 3, 3, pp. 258-266.
- FONTES J.-C. et PIERRE C. (1978). — Oxygen 18 changes in dissolved sulphate during sea water evaporation in saline ponds. *In* : Tenth Intern. Congr. on Sedimentology, Jerusalem, pp. 215-216 (Abstr.).
- FONTES J.-C., FLORKOWSKI T., POUCHAN P. and ZUPPI G.M. (1979). — Preliminary isotopic study of Lake Asal system (Republic of Djibouti). *In* : Isotopes in Lake studies, I.A.E.A., Vienne, pp. 163-174.
- GONFIANTINI R. (1965). — Effetti isotopici nell'evaporazione di acque salate. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat.*, 72, pp. 550-569.
- GONFIANTINI R. and FONTES J.-C. (1963). — Oxygen isotopic fractionation of the water of crystallization of gypsum. *Nature*, 200, pp. 644-646.
- GOUVEA DA SILVA ROSA R.B. (1980). — Migration des sels et des isotopes lourds à travers des colonnes de sédiment non saturé sous climat semi-aride. Thèse 3e cycle Sciences, Paris.
- HOLSER W.T. (1966). — Diagenetic polyhalite in recent salt from Baja California. *Amer. Mineral.*, 51, pp. 99-109.
- HOLSER W.T. and KAPLAN I.R. (1966). — Isotope geochemistry of sedimentary sulfates. *Chem. Geol.*, 1, pp. 93-135.
- JENSEN M.L. and NAKAI N. (1962). — Sulfur isotope meteorite standards, results and recommendations. *In* : Biogeogr. of sulfur isotopes, Ed. Jensen M.L., Natl. Sci. Found. Symp., pp. 30-35.
- JUSSERAND C., GOULEAU D. et FONTES J.-C. (1979). — Comportement isotopique des vases littorales à l'évaporation. *Oceanologica Acta*, 2, 3, pp. 349-354.
- KINSMAN D.J.J. (1966). — Gypsum and anhydrite of recent age, Trucial coast, Persian Gulf. *In* : Second Symposium on Salt, *Northern Ohio Geol. Soc.*, pp. 302-326.
- KINSMAN D.J.J. (1969). — Modes of formation, sedimentary associations and diagnostic features of shallow-water and supratidal evaporites. *A.A.P.G. Bull.*, 53, 4, pp. 830-840.

- LLOYD R.M. (1967). — Oxygen 18 composition of oceanic sulfate. *Science*, 156, pp. 1228-1231.
- LLOYD R.M. (1968). — Oxygen isotope behaviour in the sulfate-water system. *J. Geophys. Res.*, 73, 18, pp. 6099-6110.
- LONGINELLI A. and CRAIG H. (1967). — Oxygen 18 variations in sulfate ions in sea water and saline lakes. *Science*, 156, pp. 56-59.
- PHLEGER R.B. (1969). — A modern evaporite deposit in Mexico. *A.A.P.G. Bull.*, 53, 4, pp. 824-829.
- PHLEGER F.B. and EWING G.C. (1962). — Sedimentology and oceanography of coastal lagoons in Baja California, Mexico. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 73, pp. 145-182.
- PIERRE C. et FONTES J.-C. (1979). — Oxygène 18, carbone 13, deutérium et soufre 34 : marqueurs géochimiques de la diagenèse et du paléomilieu évaporitiques du Messinien de la Méditerranée. *Bull. Mus. nat. Hist. nat.*, Paris, 4e sér., 1, sect. C, 1, pp. 3-18.
- SHEARMAN D.I. (1966). — Origin of marine evaporites by diagenesis. *Inst. Mining Metallurgy Trans.*, pp. 75-208.
- SHEARMAN D.J. (1970). — Recent halite rocks, Baja California, Mexico. *Inst. Mining Metallurgy Trans.*, B, 79, pp. 155-162.
- SHEARMAN D.J. (1971). — Marine evaporites. The calcium sulphate facies. The University of Calgary, A.S.P.G. Seminar, unpublished report, 65 p.
- SMITH S.M.B. (1971a). — Evaporite on a supratidal flat, Baja California, Mexico. *In* : Second Nat. Coastal and Shallow Water Res. Confer., p. 209 (Abstract).
- SMITH S.M.B. (1971b). — Mechanisms of evaporite formation, Ometepec lagoon, Gulf of California, Mexico. *In* : Second Nat. Coastal and Shallow Water Res. Confer., p. 210 (Abstract).
- SMITH S.M.B. (1972). — Progress report of research studies of the supratidal evaporite complex, salina Ometepec, Baja California, Mexico. Science Research Council, London, unpublished report, may 1972.
- SMITH S.M.B. (1973). — Halite crystallization in supratidal salina, Ometepec lagoon, Baja California, Mexico. *A.A.P.G. Bull.*, 74, p. 805 (Abstract).
- SOFER Z. and GAT J.R. (1972). — Activities and concentrations of oxygen 18 in concentrated aqueous salt solutions : analytical and geophysical implications. *E.P.S.L.*, 15, pp. 232-238.
- SOFER Z. and GAT J.R. (1975). — The isotope composition of evaporating brines : effect of the isotopic activity ratio in saline solutions. *E.P.S.L.*, 26, pp. 179-186.
- THODE H.G., MONSTER J. and DUNFORD H.B. (1961). — Sulphur isotope geochemistry. *Geochem. Cosmochem. Acta*, 26, pp. 159-174.
- THODE H.G. and MONSTER J. (1965). — Sulfur isotope geochemistry of petroleum, evaporites and ancient seas. *In* : Fluids in subsurface environments. *A.A.P.G. Memoir*, 4, pp. 367-377.
- THOMPSON R.W. (1968). — Tidal flat sedimentation on the Colorado River Delta, Northwestern Gulf of California. *Geol. Soc. Amer., Memoir*, 107.
- USIGLIO J. (1849). — Analyse de l'eau de la Méditerranée sur les côtes de France. *Ann. Chimie et Phys.*, 3, 27, pp. 172-191.
- VONDER HAAR S.P. (1972). — Semiarid coastal evaporite environment at laguna Mormona, Pacific Coast, Baja California, Mexico. M.S. Thesis, Univ. South. Calif., Los Angeles.
- VONDER HAAR S.P. (1976). — Evaporites and algal mats at laguna Mormona, Pacific Coast, Baja California, Mexico, Ph. D., Univ. South Calif., Los Angeles.
- WEST I.M., ALI Y.A. and HILMY M.E. (1979). — Primary gypsum nodules in a modern sabkha on the Mediterranean coast of Egypt. *Geology*, 7, pp. 354-358.

