

REPUBLIQUE TUNISIENNE

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE

Direction des Ressources en Eau et en S

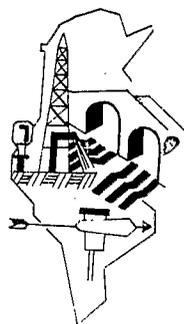
Division des Ressources en Eau

SERVICE HYDROLOGIQUE

Convention D. R. E. S. - O. R. S. T. O. M.

Action de type B.

Les Apports Telluriques Naturels Dissous de la Medjerdah à la Méditerranée



J. COLOMBANI

O. R. S. T. O. M.

OFFICE DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE OUTRE-MER

Mission en Tunisie



D8
COL

MARS 1977

LES APPORTS TELLURIQUES NATURELS

DE LA MEDJERDAH A LA MEDITERRANEE

I. INTRODUCTION

A l'occasion de l'étude monographique de la Medjerdah (1) il a été possible d'étudier d'une part les transports de sels dissous, en particulier à Medjez el Bab, d'autre part la composition de ces sels dissous. Par ailleurs l'établissement d'un modèle mathématique pour l'aménagement des eaux du Nord de la Tunisie (2) a conduit les auteurs de ce modèle à compléter une série de 40 années de transports de sel à Bou Salem. Ces divers éléments permettent une estimation correcte des apports en sels de la Medjerdah à la mer. Il s'agit essentiellement de sels provenant des roches du bassin versant d'où l'expression utilisée : "apports telluriques naturels".

II. LES TRANSPORTS DE SELS DISSOUS DE LA MEDJERDAH A MEDJEZ EL BAB

II.1. - Poids annuel total transporté

L'étude des débits de la Medjerdah à Medjez el Bab a pu être faite pour 22 années de 1948-1949 à 1969-70 dans le cadre de la Monographie de la Medjerdah (1). Pour 10 années les salinités moyennes journalières sont connues soit par échantillonnage journalier soit par interpolation, possible dans certains cas, soit encore par estimation correcte pour les quelques journées manquant encore après interpolation. La faible précision des estimations faites dans ce dernier cas a cependant peu d'influence sur les transports dissous annuels.

Le tableau II.1. (1) ci-après rassemble les résultats obtenus :

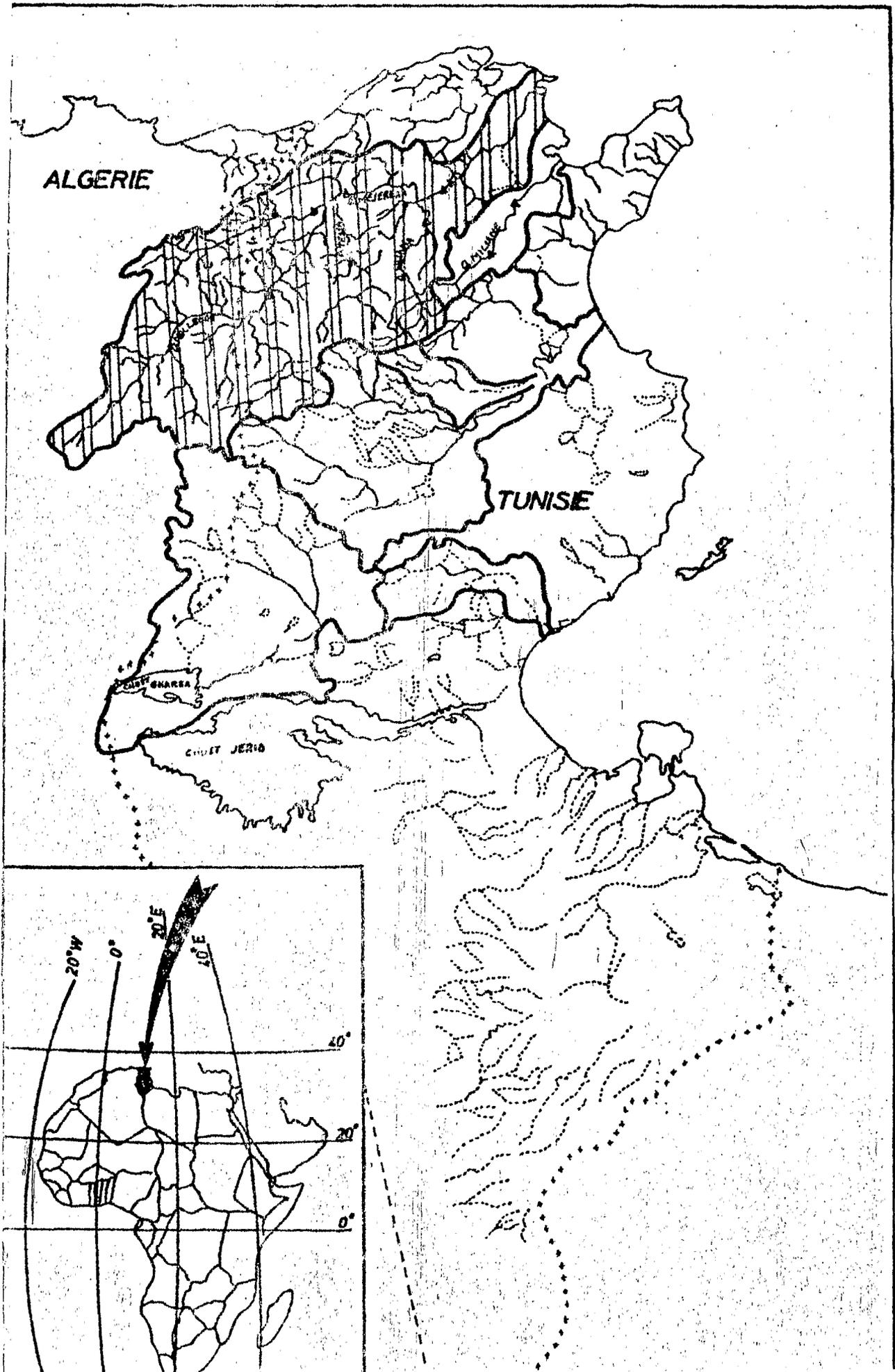
D 8
COL



15 AVR. 1978

116 601

PLAN DE SITUATION DE LA MEDJERDAH



Année	V	\bar{S}	T	Observation
1953 - 54	1419	0,94	1339	
1954 - 55	411	1,41	578	
1955 - 56	1234	1,15	1413	
1956 - 57	591	1,82	1077	
1957 - 58	1105	1,26	1387	
1958 - 59	1338	1,25	1679	
1959 - 60	820	1,53	1255	
1960 - 61	430	1,77	761	
1961 - 62	604	1,28	772	
1962 - 63 à 1968 - 69				années incomplètes
1969 - 70	2125	1,03	2187	
Moyenne	1008	1,24	1245	
V = volume annuel écoulé en millions de m ³ \bar{S} = salinité moyenne annuelle en g/l T = poids des sels transportés en 10 ³ tonnes				

Tableau II.1.(1) : Transports annuels de la Medjerdah à Medjez el Bab.

Sur le graphique II.1. (a) ci-après on discerne une corrélation négative ($r = -0,77$) entre la salinité moyenne annuelle \bar{S} et le volume annuel écoulé. On peut ajuster une formule exponentielle par la méthode des moindres carrés appliquée au logarithme de \bar{S}

$$\bar{S} \text{ g/l} = 1,8 e^{-3,128 \cdot 10^{-4} V}$$

V en millions de m³

La corrélation n'est pas très forte mais la tendance est cependant très nette. Les écarts sont dus essentiellement à l'hétérogénéité du bassin et à l'origine géographique variée des crues.

MEJEZ EL BAB TRANSPORTS ANNUELS DES SELS DISSOUS

$$\bar{S} = 1,8^e - 3,128 \cdot 10^{-4} V$$

COEFFICIENT DE CORRELATION $r = 0,77$

SALINITE MOYENNE 5 g/l

2,0

1,5

1,0

0,5

T. 10³/l

2.000

1.000

500

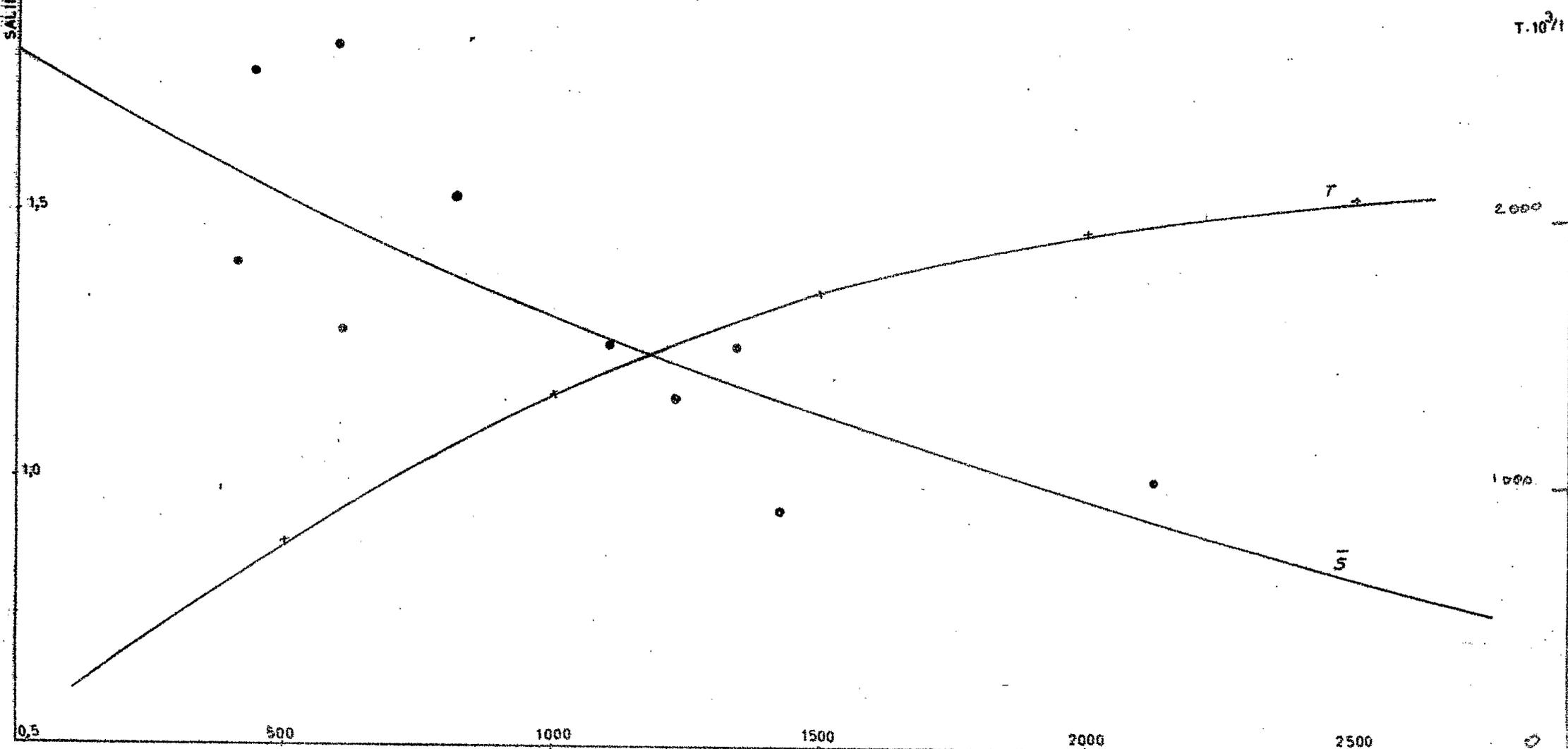
1000

1500

2000

2500

VOLUME ANNUEL ECOULE 10⁶ m³



L'écart type s de la moyenne \bar{T} des 10 années de transport de sels est $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$

σ écart type de la série des tonnages annuels

n nombre d'années d'observations

$$\bar{T} = 1245 \quad \sigma = 479 \quad n = 10 \quad s = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = 151$$

On peut donc estimer qu'il y a 9 chances sur 10 pour que la moyenne vraie soit comprise dans l'intervalle

$$(1245 - 2s, 1245 + 2s)$$

$$\text{soit } (942 - 1548)$$

Ceci nous montre que l'évaluation de la moyenne sur 10 années de mesure est peu précise.

II.2. - Nature des sels transportés

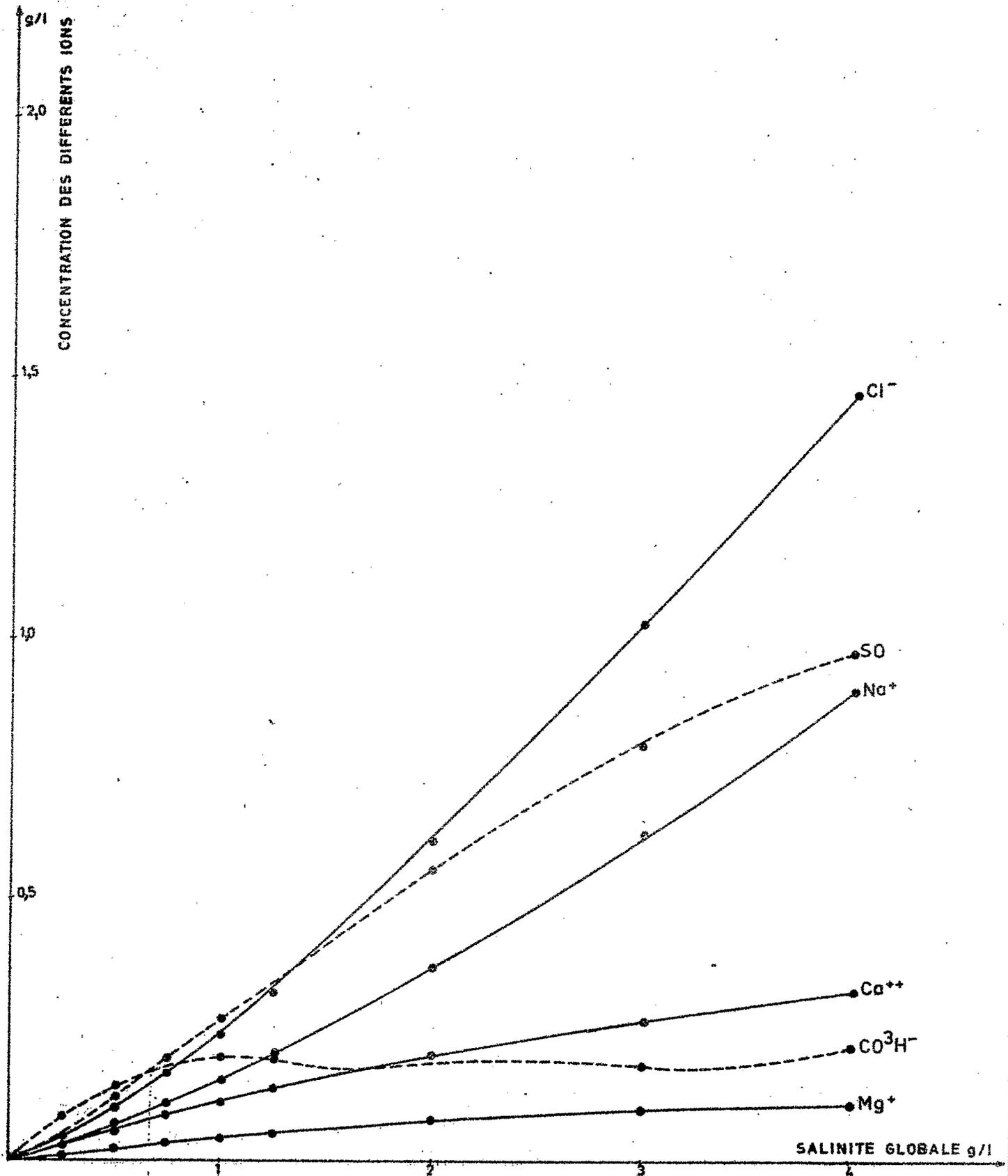
Toujours à l'occasion de l'étude de la Medjerdah nous avons étudié l'évolution de la composition des sels dissous en fonction de la salinité totale.

Cette étude a été faite statistiquement grâce aux résultats de 1230 analyses complètes. Le graphique II.2.(a) représente les résultats obtenus résumés aussi dans le tableau II.2.(1) ci-dessous :

S g/l	Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺⁺		Cl ⁻		SO ⁴⁻⁻		CO ₃ H ⁻	
	méq/l	g/l	méq/l	g/l	méq/l	g/l	méq/l	g/l	méq/l	g/l	méq/l	g/l
0,25	1,8	0,036	0,62	0,0007	1,24	0,028	1,19	0,042	1,13	0,054	1,34	0,082
0,5	3,44	0,069	1,25	0,015	2,78	0,064	2,77	0,098	2,48	0,119	2,21	0,135
0,75	4,87	0,097	1,88	0,023	4,61	0,106	4,61	0,164	3,93	0,189	2,82	0,172
1,00	6,22	0,124	2,54	0,030	6,57	0,151	6,69	0,240	5,42	0,260	3,21	0,196
1,25	7,28	0,146	3,28	0,039	8,84	0,203	9,07	0,322	6,98	0,335	3,36	0,205
1,50	8,05	0,61	4,09	0,049	11,5	0,265	12,0	0,424	8,59	0,412	3,09	0,189
2	9,69	0,194	5,52	0,066	16,7	0,384	17,2	0,612	11,5	0,550	3,19	0,194
3	13,4	0,267	7,75	0,093	27,4	0,631	28,9	0,03	16,5	0,793	3,08	0,188
4	16,6	0,333	9,51	0,114	38,9	0,895	41,0	1,46	20,3	0,972	3,75	0,229

Tableau II.2.(1) : Composition des sels dissous en fonction de la salinité totale à Medjez el Bab

MEJERDAN A MEDJEZ EL BAB
 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN IONS
 DES EAUX
 FONCTION DE LA SALINITE GLOBALE



On peut grâce aux graphiques II.1. (a) et II.2. (a) établir la variation des poids transportés annuellement pour les différents sels en fonction du volume annuel écoulé.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau II.2. (2) ci-dessous et traduit aussi par le graphique II.2. (b) :

V	\bar{S}	Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺		Cl ⁻		SO ₄ ⁻⁻		CO ₃ H ⁻		TOTAL T
		g/l	T	g/l	T	g/l	T	g/l	T	g/l	T	g/l	T	
400	1,58	0,175	70	0,05	20	0,283	114	0,47	188	0,435	174	0,185	74	640
590	1,50	0,161	95	0,049	29	0,265	156	0,424	250	0,412	243	0,189	112	885
1170	1,25	0,146	171	0,039	46	0,203	238	0,322	377	0,335	392	0,205	240	1464
1900	1,00	0,124	236	0,03	57	0,151	287	0,24	456	0,260	494	0,196	372	1902
2795	0,75	0,097	271	0,023	64	0,106	296	0,164	458	0,189	528	0,172	401	2098

V = volume d'eau écoulé en 10⁶ m³

\bar{S} = salinité moyenne en g/l

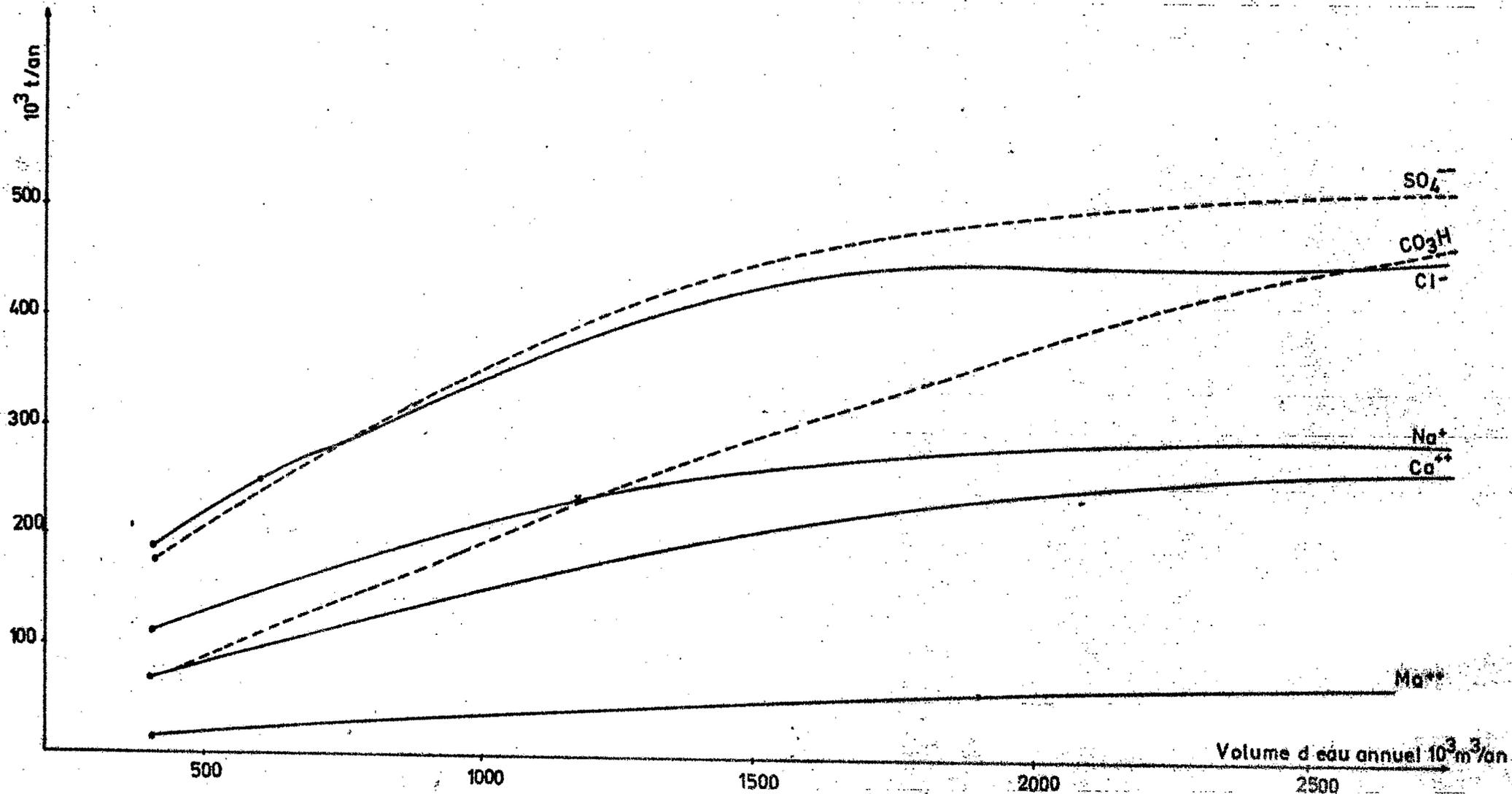
T = poids annuel transporté pour chaque élément et au total en milliers de tonnes.

Ce calcul ne serait juste que si la relation entre la concentration des différents ions et la salinité globale était linéaire, ce qui n'est pas tout à fait le cas. Les résultats sont donc seulement approchés mais très proches de la réalité. Le potassium n'ayant été que rarement dosé jusqu'à ces dernières années, il n'en n'a pas été tenu compte. Cependant la quantité de potassium est généralement faible par rapport à celle de Sodium. On constate que les poids transportés de chlore, sodium et magnésium n'augmentent plus que très peu au-delà de 1.900.000 m³ d'eau écoulés annuellement. Par contre la quantité de CO₃H transporté continue à croître ainsi que celle du calcium et du sulfate. Cela s'explique si l'on considère que d'une part sodium et chlore sont moins accessibles aux eaux de ruissellement, à l'opposé du sulfate de calcium existant plus souvent en surface, et du CO₃H provenant du CO₂ atmosphérique et attaquant en surface les roches calcaires.

En année moyenne on a :

V 10 ⁶ m ³	\bar{S} g/l	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	CO ₃ H ⁻	TOTAL	(10 ³ T/an)
1008	1,24	146	40	205	330	335	189	1245	

MEJERDAH A MEJEZ EL BAB
TRANSPORTS ANNUELS DES DIFFERENTS IONS EN FONCTION DU VOLUME ANNUEL D'EAU
(POTASSIUM EXCLU)



III. LES TRANSPORTS DE SELS DISSOUS DE LA MEDJERDAH A BOU SALEM

III.1. - Poids annuel total transporté

Si nous ne possédons que 182 analyses complètes pour cette station nous avons aussi 1277 déterminations de résidus secs et 2581 mesures de conductivité. Il n'y a aucune année où toutes les salinités journalières soient connues mais nous avons vu qu'à l'occasion de l'étude Hydrologique pour l'aménagement des eaux du Nord de la Tunisie (2) 40 années de transports de sels ont été complétées par une méthode de tirage au hasard conditionnel ^{tenant} compte du débit et de la saison. Ce sont les résultats de cette étude que nous allons utiliser. Les résultats obtenus en ce qui concerne les moyennes annuelles sont très corrects. Le tableau III.1. (1) à la page suivante rassemble les résultats.

Sur le graphique III.1. (a) on discerne une corrélation négative (r = -0,76) entre la salinité moyenne annuelle et le volume d'eau annuel écoulé. On peut ajuster une formule exponentielle par la méthode des moindres carrés appliquée au logarithme de \bar{S} :

$$\bar{S} = 1,55 e^{-5,2 \cdot 10^{-4} V}$$

$$\bar{S} \text{ en g/l} \quad V \text{ en } 10^6 \text{ m}^3$$

Les mêmes remarques qu'à Medjez el Bab concernant l'hétérogénéité du bassin et son influence sur la dispersion des résultats peuvent être faites. L'écart type s de la moyenne \bar{T} des 40 années

d'observation est $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ σ étant l'écart type pour la série des tonnages annuels
 n le nombre d'années d'observation

$$s = \frac{226}{\sqrt{40}} = 35,7$$

On peut donc estimer qu'il y a 9 chances sur 10 pour que la moyenne "vraie" soit dans l'intervalle (631 - 773).

Si les résultats apparaissent moins dispersés que ceux de Medjez sur 10 ans la précision n'est pas encore très grande (10 % d'écart relatif entre les bornes de cet intervalle au lieu de 24,3 % à Medjez el Bab.

BOU SALEM 40 ANS

$$S = 1550 - 0,22 \cdot 10^{-4} V \quad T = 3V$$

COEFFICIENT DE CORRELATION (S, V)

$$r = 0,76$$

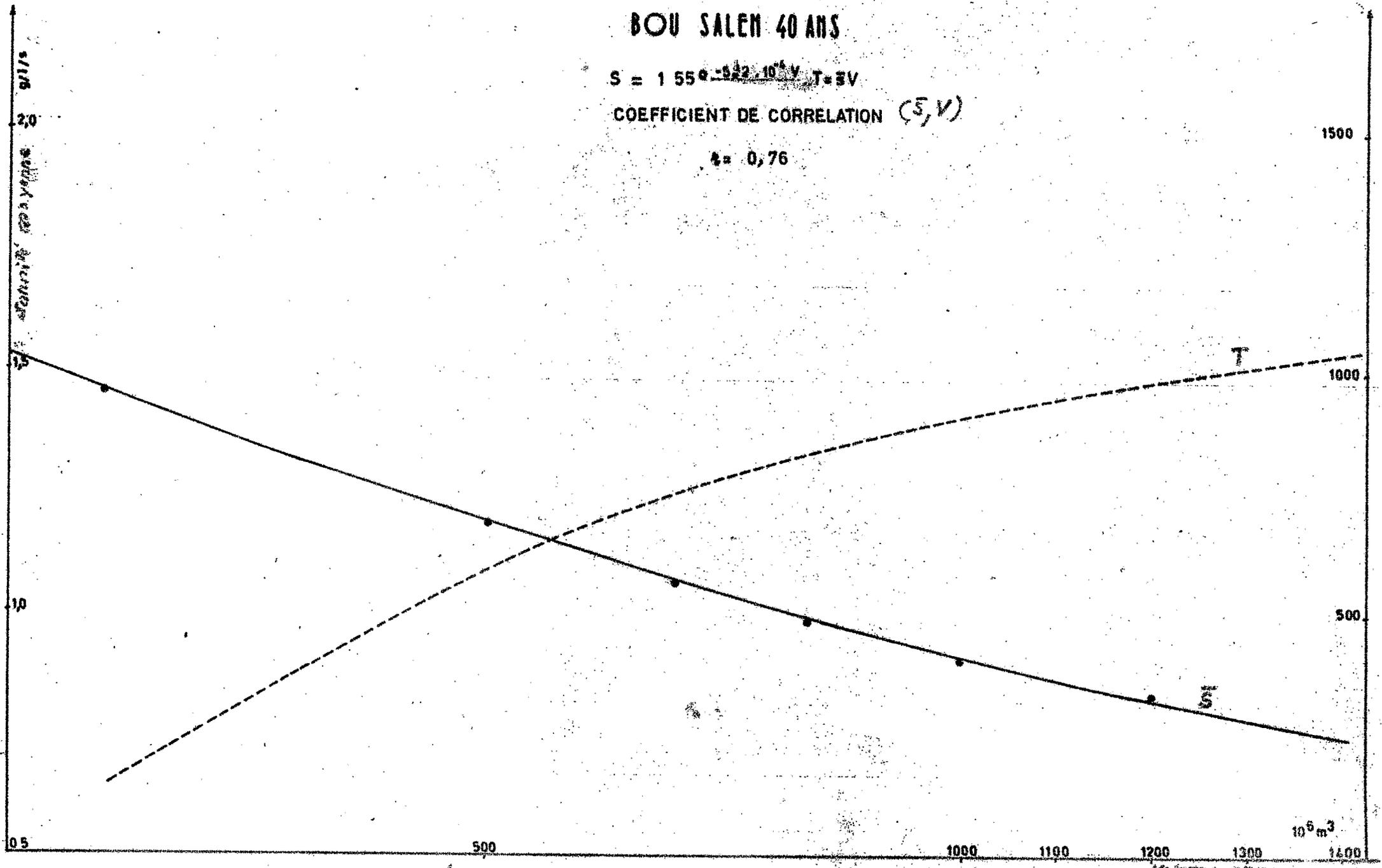


Tableau III.1. (1)

Année	V	\bar{S}	T	Année	V	\bar{S}	T
1925-26	513	1,05	539	1948-49	1106	0,83	918
1926-27	449	1,26	566	1949-50	547	1,11	607
1927-28	1019	0,86	876	1950-51	308	1,44	444
1930-31	907	0,89	807	1951-52	1051	0,97	1019
1931-32	713	0,88	627	1952-53	1117	0,93	1039
1932-33	585	1,20	702	1953-54	1043	0,85	887
1933-34	546	1,12	612	1954-55	300	1,18	356
1934-35	983	0,87	855	1955-56	729	1,07	780
1935-36	283	1,58	447	1956-57	498	1,35	672
1936-37	766	1,09	835	1958-59	1072	0,99	1061
1937-38	499	1,24	619	1959-60	722	1,38	996
1938-39	1330	0,86	1144	1960-61	422	1,56	698
1939-40	1002	0,89	892	1961-62	453	1,02	462
1940-41	630	1,20	756	1962-63	414	1,12	464
1941-42	1242	0,80	994	1963-64	318	1,10	570
1943-44	444	1,27	564	1964-65	626	1,02	639
1944-45	334	1,26	421	1965-66	412	1,36	560
1945-46	454	1,01	459	1966-67	289	1,63	471
1947-47	695	0,82	570	1968-69	231	1,79	413
1947-48	515	1,08	556	1969-70	1227	0,99	1215
				Ecart type	$\sigma=309,7$	$\sigma=0,245$	$\sigma=226$
				Moyenne	$\bar{V}= 675$	$1,04 \left(\frac{\bar{T}}{\bar{V}} \right)$	$\bar{T} = 702$

V , en millions de m³, volume annuel écoulé

\bar{S} , salinité moyenne annuelle en g/l

T , en 10³ tonnes, poids des sels transportés annuellement.

III.2. - Nature des sels transportés

Dans la Monographie de la Medjerdah on trouvera l'évolution de la composition saline des eaux de la Medjerdah à Bou Salem en fonction de la salinité totale. Cette étude a été faite avec un nombre relativement petit d'analyses (182 seulement) mais les résultats sont quand même assez significatifs. Les résultats sont représentés par le graphique III.2. (a) et récapitulés dans le tableau III.2.(1) :

S	Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺		Cl ⁻		SO ⁴⁻⁻		CO ₃ H ⁻	
	g/l	méq/l	g/l	méq/l	g/l	méq/l	g/l	méq/l	g/l	méq/l	g/l	méq/l
0,25	1,73	0,03	0,61	0,007	1,31	0,03	1,20	0,04	1,06	0,05	1,39	0,05
0,5	3,26	0,07	1,25	0,015	2,97	0,07	2,87	0,10	2,47	0,12	2,19	0,13
0,75	4,48	0,09	1,88	0,023	5,04	0,12	4,82	0,17	3,89	0,19	2,69	0,16
1,00	5,67	0,11	2,51	0,030	7,29	0,17	7,20	0,26	5,49	0,26	2,79	0,17
1,25	6,68	0,13	3,11	0,037	9,79	0,23	9,75	0,35	7,06	0,34	2,77	0,17
1,50	7,59	0,15	3,72	0,045	12,4	0,29	12,6	0,45	8,42	0,40	2,76	0,17
2	8,84	0,18	4,95	0,06	18,1	0,42	17,9	0,64	10,9	0,52	3,09	0,19
3	11,1	0,22	6,80	0,08	30,8	0,71	31,4	1,11	14,4	0,69	3,02	0,18
4	13,5	0,27	8,66	0,10	43,6	1,00	45,6	1,62	17,2	0,83	2,93	0,18

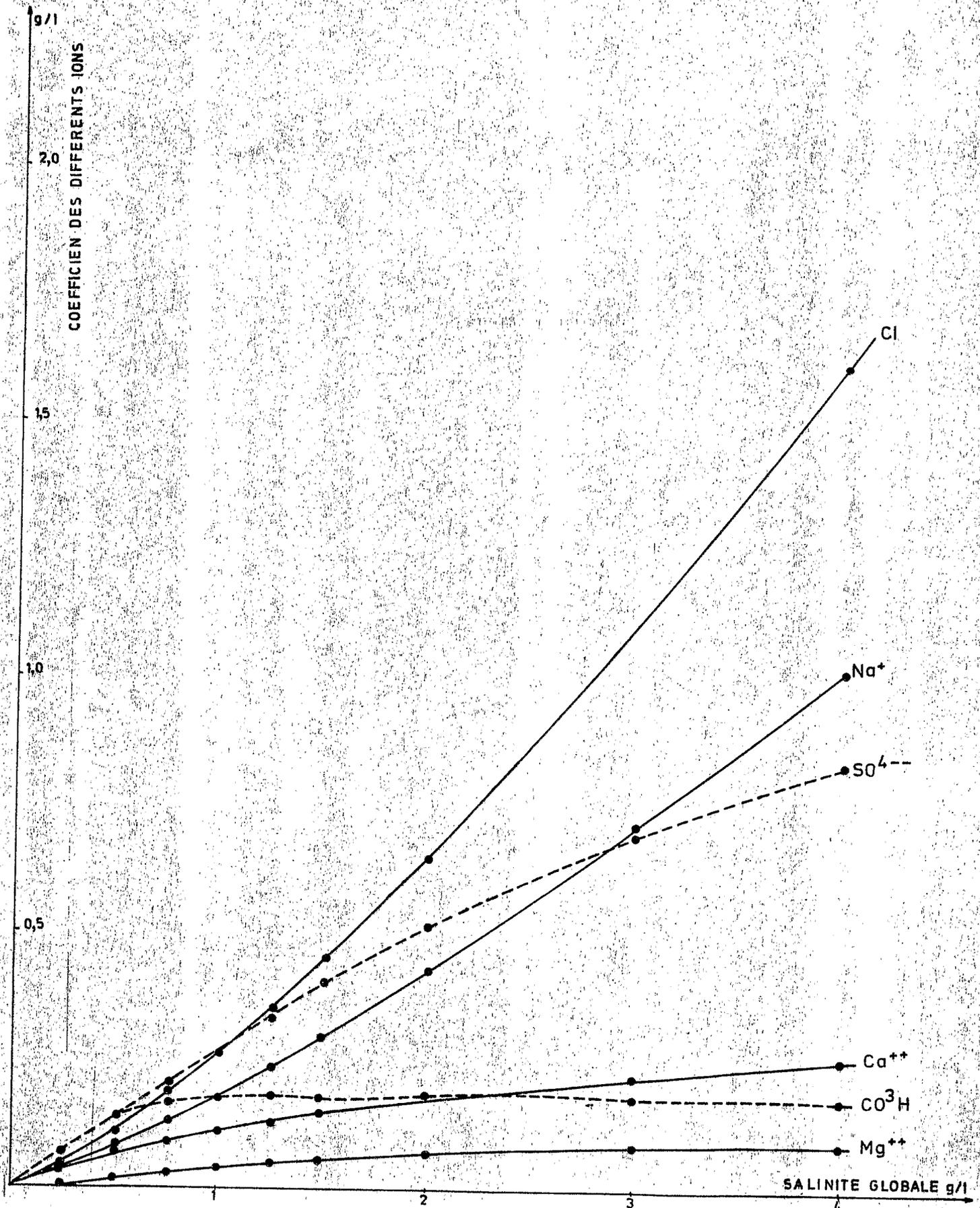
Tableau III.2. (1) Composition des sels dissous en fonction de la salinité totale à Bou Salem

La composition des graphiques III.1.(a) et III.2.(a) permet l'évaluation des transports annuels pour chaque ion. Les résultats sont rassemblés dans le tableau III.2. (2) ci-dessous et figurés sur le graphique III.2. (b) :

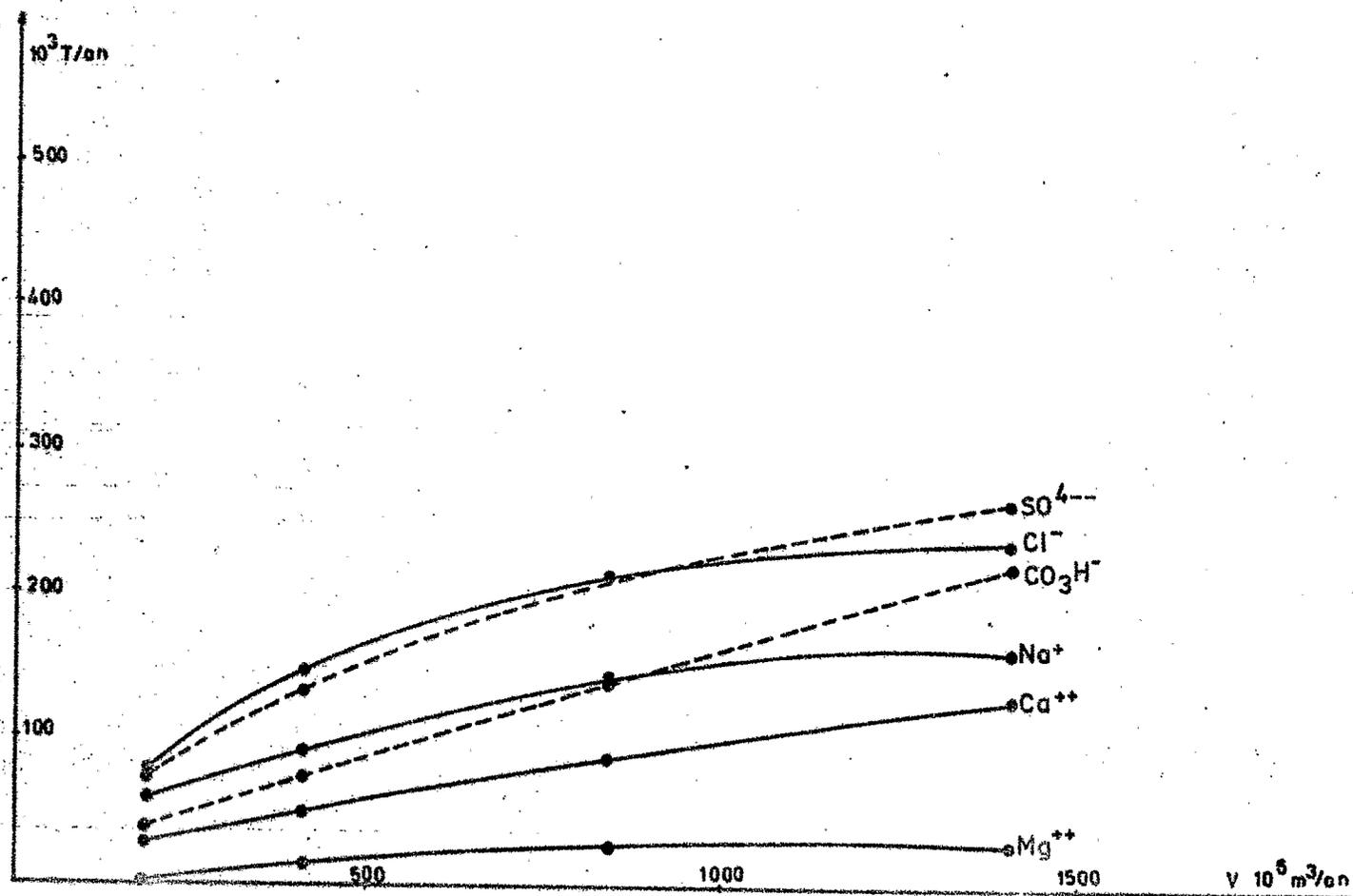
V	S	Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺		Cl ⁻		SO ⁴⁻⁻		CO ₃ H ⁻		TOTAL
		g/l	T	g/l	T	g/l	T	g/l	T	g/l	T	g/l	T	
185	1,40	0,14	26	0,042	8	0,27	50	0,41	76	0,38	70	0,17	31	261
410	1,25	0,13	53	0,037	15	0,23	94	0,35	144	0,34	139	0,17	70	515
840	1,00	0,11	92	0,030	25	0,17	143	0,26	218	0,26	218	0,17	143	839
1400	0,75	0,09	126	0,023	32	0,12	168	0,17	238	0,19	266	0,16	224	1054

Tableau III.2. (2) Transports annuels des différents ions à Bou Salem

MEJERDAH A BOU SALEM
 EVOLUTION DES CONCENTRATIONS EN IONS DES EAUX
 FONCTION DE LA SALINITE GLOBALE



MEDJERDAH A BOU SALEN
TRANSPORTS ANNUELS DES DIFFERENTS IONS EN FONCTION DU
VOLUME ANNUEL D'EAU
(POTASSIUM EXCLU)



Des remarques analogues à celles faites pour Medjez el Bab quant à la précision des résultats et à la non prise en compte du potassium peuvent être faites. L'évolution des transports est aussi similaire à celle de Medjez el Bab avec des eaux nettement moins salées toutefois.

En année moyenne on a :

V 10 ⁶ m ³	\bar{S} g/l	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	Cl ⁻	SO ⁴⁻⁻	CO ₃ H ⁻	TOTAL	(10 ³ T/an)
675	1,04	75	18	126	190	180	113	702	

IV. - COMPARAISON DE MEDJEZ EL BAB 21000 Km² et BOU SALEM 16230 Km²

Nous avons des résultats simultanément aux deux stations pour 9 années seulement. Il est intéressant de voir ce que donne une étude de corrélation durant ces neuf années.

Années	V 10 ⁶ m ³ /an		\bar{S} g/l		T 10 ³ T/an	
	Medjez	B. Salem	Medjez	B. Salem	Medjez	B. Salem
1953-54	1419	1043	0,94	0,85	1339	887
1954-55	411	300	1,41	1,18	578	356
1955-56	1234	729	1,15	1,07	1413	780
1956-57	591	498	1,82	1,35	1077	672
1958-59	1338	1072	1,25	0,99	1679	1061
1959-60	820	722	1,53	1,38	1255	996
1960-61	430	422	1,77	1,56	761	658
1961-62	604	453	1,28	1,02	772	462
1969-70	2125	1227	1,03	0,99	2187	1215
Moyennes	997	718	1,35 (1)	1,15 (1)	1229	787
σ	574	330	0,31	0,23	505	281
$\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$	191	110	0,10	0,08	168	94

(1) les moyennes ici données sont les moyennes arithmétiques
 les moyennes obtenues par le rapport $\frac{\bar{T}}{\bar{V}}$ sont respective-
 ment Medjez : 1,23 g/l
 Bou Salem : 1,10 g/l

IV.1. - Corrélation entre les volumes écoulés

Le coefficient de corrélation est $r = 0,95$ donc tout à fait significatif ce qui est normal s'agissant de deux stations consécutives sur le même fleuve, la différence de superficie des bassins versants, n'étant pas considérable (21000 km² à Medjez el Bab contre 16230 km² à Bou Salem). On peut ajuster soit une formule linéaire soit une formule exponentielle :

$$\text{Formule linéaire : } V_{\text{Medjez}} = 1,653 V_{\text{B.Salem}} - 191$$

Formule exponentielle :

$$V_{\text{Medjez}} = 255 e^{1,69 \cdot 10^{-3} V_{\text{B.Salem}}}$$

(V en 10⁶ m³)

Les deux formules ne sont valables que dans un intervalle 200 . 10⁶ à 1500 . 10⁶ m³/an environ pour les volumes annuels de Bou Salem. Les écarts aux ajustements sont dus aux affluents du bassin intermédiaire dont le débit est important (Siliana, Khalled, Béja, Zarga éventuellement) (Graphique IV.1. (a)).

IV.2. - Corrélation entre les salinités moyennes annuelles observées

Le coefficient de corrélation $r = 0,92$ est également tout à fait significatif. Nous nous sommes contentés d'une régression linéaire

$$\bar{S}_{\text{Medjez}} = 1,23 \bar{S}_{\text{B.Salem}} - 0,067 \quad (\bar{S} \text{ en g/l})$$

(Valable pour les salinités à Bou Salem comprises entre 0,7 et 1,5 g/l environ). La dispersion n'est pas trop forte autour de cette droite et elle est due essentiellement aux affluents (Graphique IV.2. (a)).

On notera que la salinité à Medjez el Bab est plus forte que celle de Bou Salem de 15 à 19 %.

IV.3. - Corrélation entre les transports totaux de sels annuels

Le coefficient de corrélation toujours élevé, est $r = 0,93$. On peut ajuster soit une formule linéaire $T_{\text{Medjez}} = 1,667 T_{\text{B.Salem}} - 80,3$ (T en 10³ tonnes) soit une formule exponentielle :

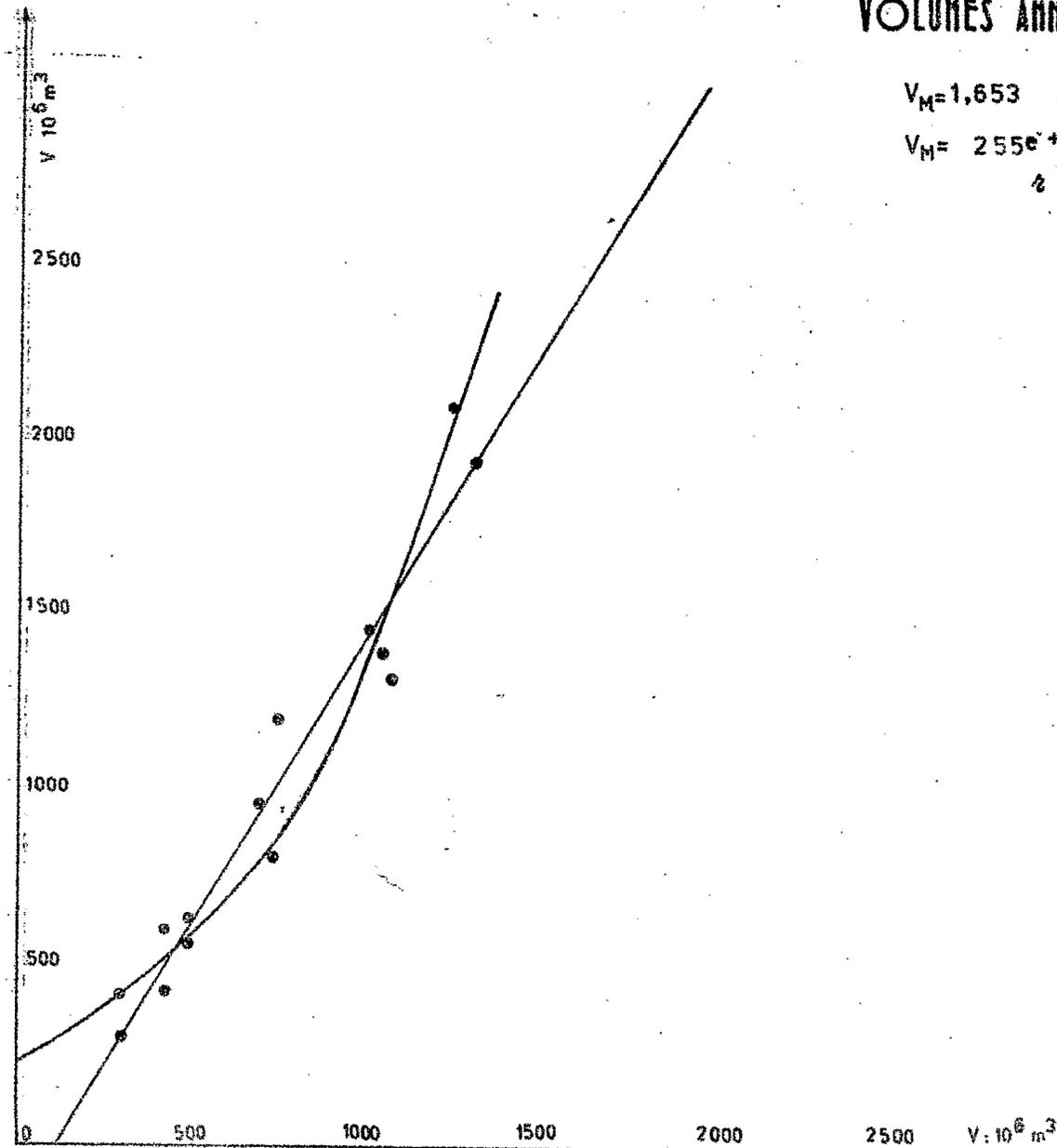
CORRELATION MEJEZ EL BAB - BOU SALEM

VOLUMES ANNUELS ECOULES

$$V_M = 1,653 \quad V_{BS} = 1,91$$

$$V_M = 255e^{\lambda} + 1,69 \cdot 10^3 V_{BS}$$

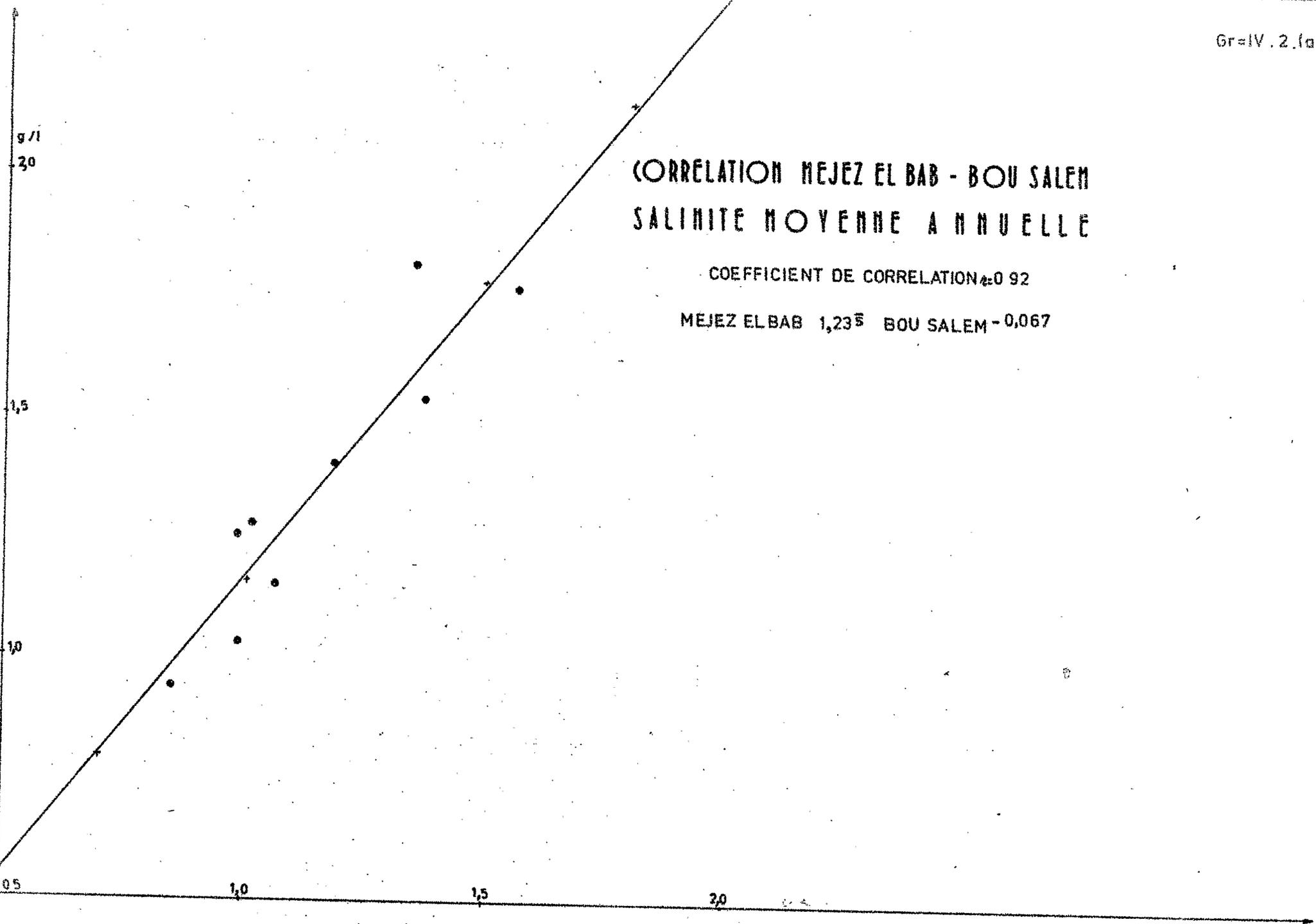
$$\lambda = 0,95$$



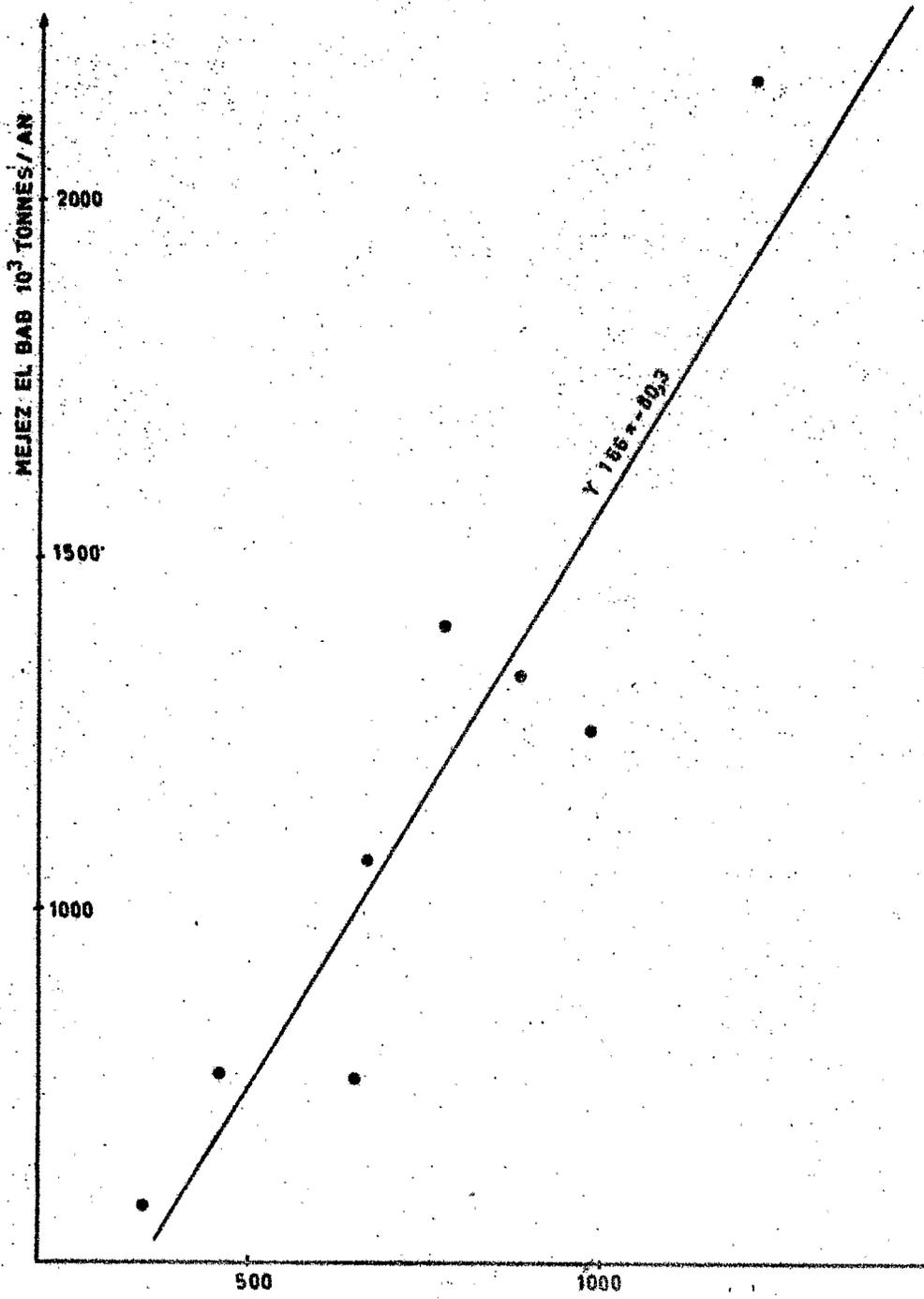
CORRELATION MEJEZ EL BAB - BOU SALEM SALINITE MOYENNE ANNUELLE

COEFFICIENT DE CORRELATION $r=0.92$

MEJEZ ELBAB $1,23\bar{5}$ BOU SALEM $-0,067$



RELATION STATISTIQUE DES TONNAGES EN SELS DISSOUS
 TRANSPORTES PAR LA MEJERDAH A BOU SALEM ET A MEJEZ EL BAB
 9 ANS (1953-61 et 1969)



MOYENNE BOU SALEM 40 ANS 1925-69 700.10³ TONNES
 MOYENNE MEJEZ EL BAB 10 ANS 1953-69 1245.10³ "
 MOYENNE PAR CORRELATION DE MEJEZ EL BAB 10 ANS 1082.10³ TONNES
 MOYENNE BOU SALEM } SUR 9 ANS COMMUNS { 787.10³
 MEJEZ EL BAB } { 1229.10³

COEFFICIENT DE CORRELATION $r = 0,93$

BOU SALEM 10³ TONNES / AN

$$T_{\text{Medjez}} = 371 e^{1,42 \cdot 10^{-3} T_{\text{B.Salem}}}$$

(T en 10^3 tonnes)

Dans un cas comme dans l'autre les formules ne sont valables que dans l'intervalle 300 000 à 1 300 000 T/an environ pour Bou Salem et la dispersion est assez grande.

IV.4. - Conclusion concernant les corrélations

Les coefficients de corrélation étant assez élevés malgré la dispersion des points autour des ajustements on peut essayer d'appliquer ces corrélations aux moyennes de Bou Salem sur 40 ans pour obtenir à Medjez des moyennes plus sûres que celles obtenues sur 10 ans d'observation. Les résultats sont les suivants :

	Bou Salem (valeur sur 40 ans)	Medjez (corrélacion linéaire)	Medjez (corrélacion exponentielle)
Moyenne des volumes annuel écoulés \bar{V} 10^6 m ³	675	925	789
Moyenne des salinités moyennes annuelles \bar{S} g/l	1,04 (1)	1,21	-
Moyenne du transport annuel \bar{T} 10^3 t	702	1086	1005

(1) rapport $\frac{\bar{T}}{\bar{V}}$

Les corrélations exponentielles donnent des valeurs pour Medjez assez faibles relativement (\bar{V} et \bar{T}). Nous utiliserons plutôt les régressions linéaires qui donnent pour \bar{V} un résultat proche de celui obtenu dans la Monographie de la Medjerdah. Les valeurs ainsi estimées pour Medjez sont :

Moyennes sur 10 ans d'observations à Medjez

$$\bar{V} = 925 \cdot 10^6 \text{ m}^3$$

1008

$$\bar{S} = (1,21 \text{ g/l}) \quad 1,17 \text{ g/l} \left(\frac{\bar{T}}{\bar{V}}\right) \quad 1,14 \left(\frac{\bar{T}}{\bar{V}}\right)$$

(par corrélation)

$$\bar{T} = 1086 \text{ T/an (notons que } \frac{\bar{T}}{\bar{V}} = 1,17)$$

V. LES APPORTS A LA MER

V.1. - Apports totaux et salinité moyenne annuelle

Nous disposons donc de valeurs moyennes concernant les transports salés à Medjez el Bab à l'exutoire d'un bassin versant de 21000 km². A la mer le bassin versant atteint un peu plus de 23000 km². Les trois oueds les plus importants du bassin intermédiaire sont le Chaffrou, l'Oued Lahmar et le Zarga de Sidi Thabet. Nous avons peu de renseignements sur ces cours d'eau. Toutefois l'Oued Lahmar présente des salinités assez élevées. On peut raisonnablement penser que leurs apports auraient plutôt tendance à renforcer la salinité de la Medjerdah, de même d'ailleurs que les eaux drainées dans les plaines de la Basse Vallée où les irrigations sont abondantes. Faute de renseignements plus précis on peut admettre qu'à la mer la salinité moyenne annuelle de la Medjerdah est au moins aussi élevée qu'à Medjez el Bab, les apports liquides et le transport total de sels étant majoré d'environ 7 %. Les apports à la mer seraient donc :

apport liquide $990 \cdot 10^6$ m³/an d'une eau contenant $\bar{S} = 1,17$ g/l

apport de sels en solution : $1,160 \cdot 10^6$ tonnes / an

(ce dernier résultat est à rapprocher de l'évaluation des apports totaux à la mer dans le monde évalués par Harvey (1945) à $2,735 \cdot 10^9$ T de sels). La Medjerdah fournirait 0,042 % des apports mondiaux totaux de sels à la mer alors qu'elle fournirait moins de 0,003 % des apports liquides continentaux (estimés à $3,75 \cdot 10^{13}$ m³/an - Ven Te Chow - dont $5 \cdot 10^{11}$ m³/an pour les apports à la Méditerranée).

La construction en 1953 du Barrage de Nebeur sur le Mellègue est susceptible d'avoir été la cause d'une certaine sursalure des eaux par dissolution des roches salifères du Trias baignées par la retenue. Cela expliquerait le fait que la salinité moyenne annuelle des eaux observée à Medjez à partir de 1953 sur 10 ans est de 1,24 g/l alors que celle obtenue par corrélation avec Bou Salem pour une période de 40 ans à partir de 1925 ne serait que de 1,17 g/l. En fait la précision des résultats ne permet pas de retenir avec sûreté une telle hypothèse.

De même on a envisagé que la construction du futur barrage de Sidi Salem sur la Medjerdah pourrait entraîner une sursalure importante pour les mêmes raisons mais ceci n'est qu'une hypothèse de travail pour les projeteurs et seule la vérification à posteriori permettra de trancher. Il est certain par contre que le développement des irrigations doit entraîner une sursalure, les eaux de colature étant nettement plus salées que les eaux d'irrigation. Les projets d'interconnexion avec certains bassins du Nord et avec le Cap Bon viennent encore compliquer la situation future. Mais même en tenant compte de tous ces facteurs il est probable que les valeurs estimées ci-dessus seront assez proches de la réalité.

V.2. - Comparaison de la composition des sels dissous avec ceux de l'eau de mer

Il est intéressant de comparer la composition des sels transportés par la Medjerdah à celle des sels de la Méditerranée, ainsi qu'à la composition des eaux continentales dans le monde.

V.2.1. - Salinité globale

Nous avons vu que la salinité moyenne des eaux de la Medjerdah à la mer peut être évaluée à 1,17 g/l. La salinité de la Méditerranée est estimée à 37 à 38 g/l en surface et à 35 à 36 g/l en profondeur.

Pour les eaux continentales si on rapproche la valeur estimée des apports en sels ($2,375 \cdot 10^9$ T/an, d'après Harvey) des apports liquides estimés ($37500 \cdot 10^9$ m³/an d'après Ven Te Chow) on obtient une salinité moyenne de 0,063 g/l (cette dernière valeur est très approximative et pourrait bien être 20 à 30 % plus élevée sinon plus). Ainsi l'eau de la Medjerdah serait 19 fois plus salée que la moyenne des apports continentaux à la mer mais 32 fois moins salée que l'eau de la Méditerranée en surface.

V.2.2. - Composition ionique

Les concentrations moyennes en ions majeurs des eaux continentales et de la Méditerranée sont indiqués dans le tableau ci-après :

	Ca ⁺⁺		Mg ⁺⁺		Na ⁺		K ⁺	
	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l
Eaux continentales (pour S = 2,25 méq/l) CONWAY (1942)	30,1	1,5	4,8	0,4	8,7	0,38	2,7	0,07
Méditerranée (38 g/l) (SVERDRUP)	440	22	1400	117	11600	506	420	11

	Cl ⁻		SO ⁴⁻⁻		CO ₃ H ⁻	
	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l	mg/l	méq/l
Eaux continentales (pour S = 2,25 méq/l) CONWAY (1942)	8,3	0,24	18,1	0,38	105	1,72
Méditerranée (38 g/l) (SVERDRUP)	20900	589	2920	61	160	2,6

Tableau V.2.2. (1)

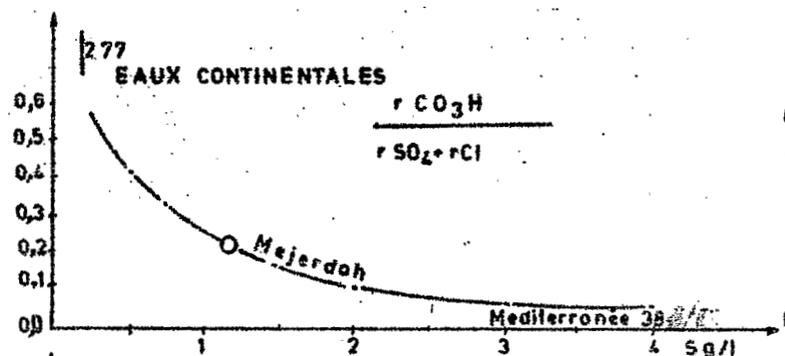
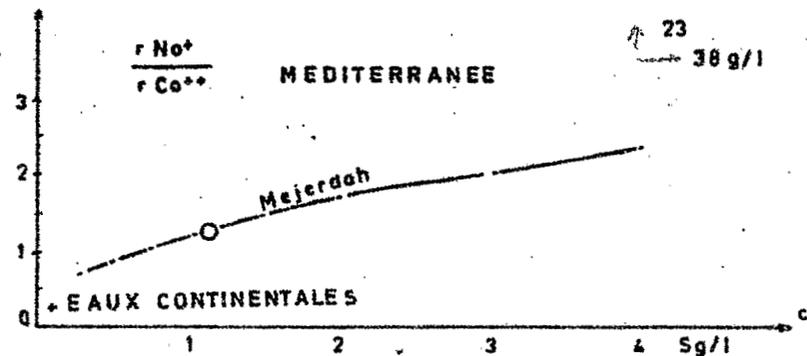
Pour la Medjerdah on se reportera au tableau II.2. (1) les valeurs observées à Medjez el Bab paraissant une bonne évaluation de celles de l'eau se déversant à la mer.

Nous comparons ci-après les rapports existant entre les concentrations des différents ions exprimés en milliéquivalents/litre pour des eaux de salinités croissantes de la Medjerdah, pour la moyenne des eaux continentales (pour S = 2,35 méq/l, d'après CONWAY - 1942), pour la Méditerranée (SVERDRUP) (pour S = 38 g/l). (tableau V.2.2.(2) à la page suivante).

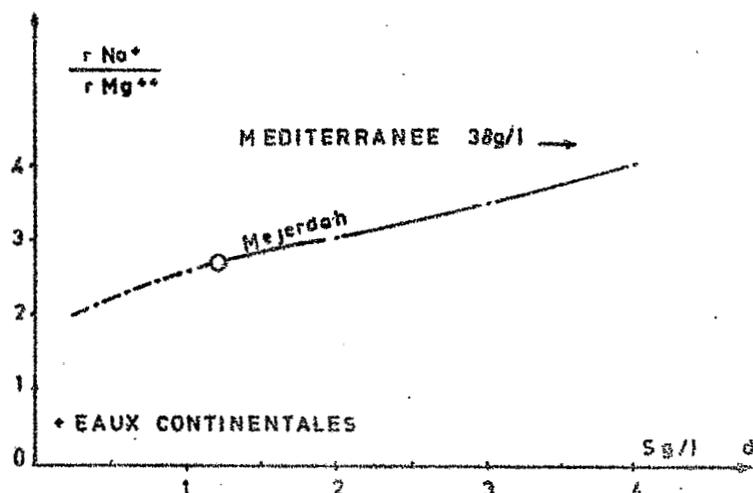
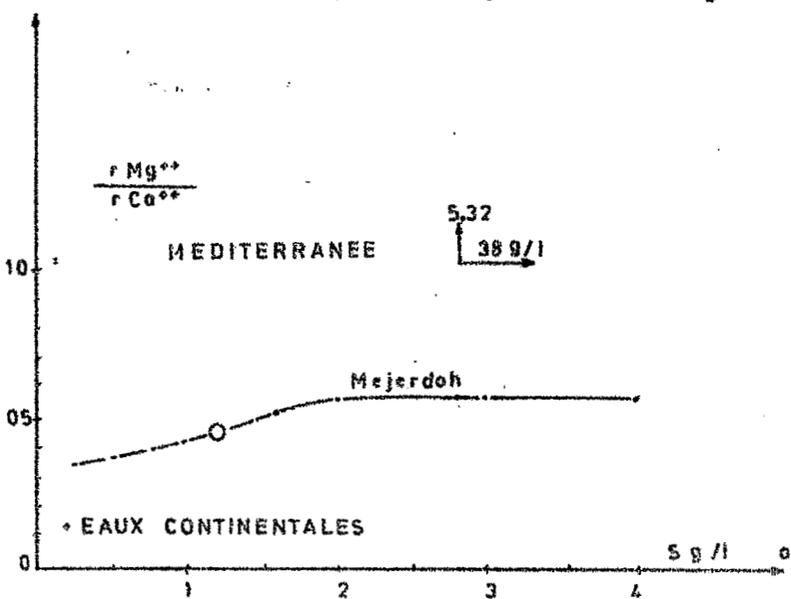
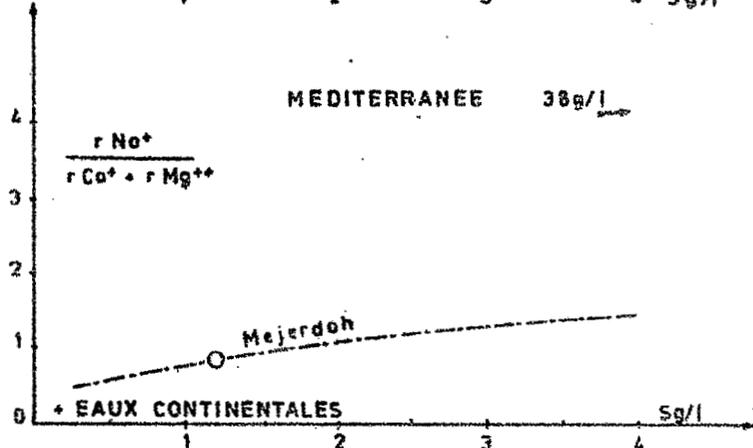
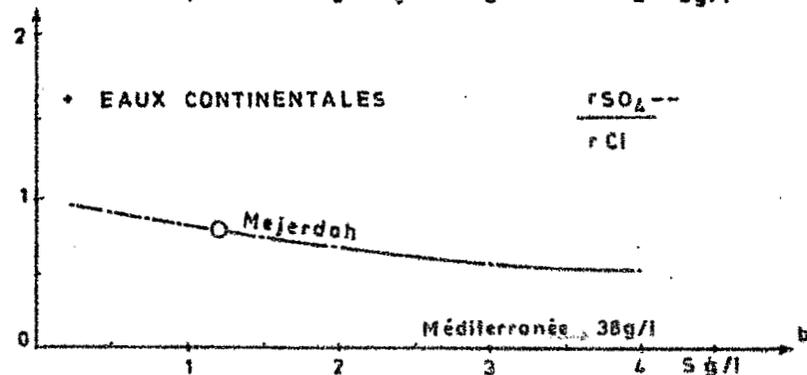
Les graphiques V.2.2.(1) (a à f) représentent ces résultats qui montrent que l'eau de la Medjerdah même très salée est assez loin quant à la composition de l'eau de mer et assez différente aussi de la moyenne des eaux continentales. On remarquera en particulier une très forte différence en ce qui concerne les rapports Na/Ca, Mg/Ca et SO₄/Cl.

Si l'on concentrait par évaporation un échantillon d'eau de composition moyenne de la Medjerdah de façon à obtenir une eau de salinité globale égale à 38 g/l la composition saline de cette eau serait très différente de celle de la Méditerranée si on exclut toute précipitation chimique ou biochimique. Pour obtenir la même composition il faudrait continuer l'évaporation en supposant une précipitation des excès de calcium, sulfate et bicarbonate en particulier.

EVOLUTION DES RAPPORTS CARACTERISTIQUES ENTRE IONS DES EAUX DE LA MEJERDAH



0 Valeur MOYENNE POUR LA MEJERDAH



Type d'eau.		$\frac{r \text{ Mg}}{r \text{ Ca}}$	$\frac{r \text{ SO}_4}{r \text{ Cl}}$	$\frac{r \text{ Na}}{r \text{ Ca}}$	$\frac{r \text{ Na}}{r \text{ Mg}}$	$\frac{r \text{ Na}}{r \text{ Ca} + r \text{ Mg}}$	$\frac{r \text{ CO}_3\text{H}}{r \text{ SO}_4 + r \text{ Cl}}$
Medjerdah S = g/l	1,17	0,44	0,78	1,16	2,66	0,81	0,227
	0,25	0,34	0,95	0,69	2	0,51	0,577
	0,5	0,36	0,90	0,81	2,22	0,59	0,421
	0,75	0,39	0,85	0,95	2,45	0,68	0,330
	1,0	0,41	0,81	1,06	2,59	0,75	0,265
	1,25	0,45	0,77	1,21	2,70	0,84	0,209
	1,50	0,51	0,72	1,43	2,81	0,95	0,150
	2	0,57	0,67	1,72	3,03	1,10	0,111
	3	0,58	0,57	2,04	3,54	1,30	0,068
4	0,57	0,50	2,34	4,09	1,49	0,061	
Eaux continentales moyennes pour S = 2,35 méq/l (CONWAY 1942) ou S = 0,178 mg/l		0,27	1,6	0,25	0,94	0,20	2,77
Eau de mer standard S = 38 g/l (Sverdrup)		5,32	0,104	23	4,32	3,64	0,004

Tableau V.2.2.(2) Rapports des concentrations ioniques de différentes eaux

En fait si la composition de l'eau de mer est vraiment constante on doit supposer que tous les apports de sels sont précipités. A raison de $2,739 \cdot 10^9$ tonnes de sels par an dans le monde, le stock de sel des océans, environ $4,8 \cdot 10^{16}$ tonnes, représente environ 17,5 millions d'années d'apports continentaux. Ces derniers éléments sont donnés à titre indicatif et sans aucune précision quant aux valeurs citées ou quant à la réalité des phénomènes mais montrent combien il est difficile de juger de la constance actuelle de la salinité moyenne des océans face aux apports relativement très faibles des eaux continentales.

Le climat et les régimes hydrologiques étant supposés inchangés, à l'échelle géologique il est vraisemblable que les apports sont précipités, principalement par l'activité biologique, une autre part étant piégée dans l'eau contenue par les sédiments marins, ces sédiments étant eux-mêmes peut-être métamorphisés peu à peu. Ainsi les sels dissous dans la mer auraient à l'origine été contenus dans les eaux juvéniles (issues des roches primitives). Les apports présents des fleuves n'influenceraient pas durablement la salinité des océans en moyenne.

BIBLIOGRAPHIE

- 1 - J.COLOMBANI, R.KALLEL, J.CLAUDE, etc...

La Monographie de la Medjerdah.
3 Tomes. Ronéo DRES-ORSTOM Tunis 1974.

- 2 - A. DOSSEUR

Etude hydrologique pour l'Aménagement des eaux du Nord de la Tunisie.
ORSTOM PARIS 1974.

- 3 - VEN TE CHOW, PH.D., Editor-in-Chief

Handbook of Applied Hydrology.
Mac Graw-Hill Book Company - 1964 -

=====