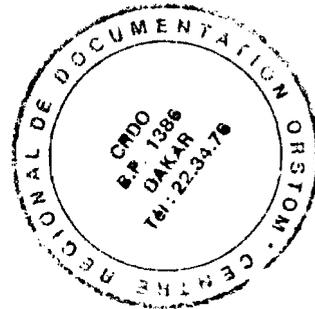




INSTITUT FRANCAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DEVELOPPEMENT EN COOPERATION



EVACIDE

EXPERIENCE D'EVAPORATION
D'UNE EAU DE SURFACE SALEE ET ACIDE
DE LA VALLEE DE DJIGUINOUM (BASSE CASAMANCE)

CRDO - DAKAR
date 16/1/96
n° 956 cote P DEØ MON

CRDO

J.P. MONTOROI, M. CARN, B. FRITZ, J.Y. GAC

DAKAR, Janvier 1993

FBI 34235

INTRODUCTION

La sécheresse qui sévit en Afrique sahélienne depuis deux décennies se fait ressentir également dans des régions réputées plus humides. Si les conséquences sont moins spectaculaires, il n'en demeure pas moins que le paysage se transforme avec ou sans le concours de l'homme. En Casamance, les transformations brutales de l'écosystème que constitue le domaine fluvio-marin sont marquées par la disparition de la végétation de mangrove, l'invasion des eaux marines, la diminution des ressources alimentaires et la dégradation chimique des sols.

Un diagnostic alarmiste a incité la prise de mesures urgentes en matière de planification régionale afin d'essayer de limiter ces effets néfastes. Devant l'ampleur et la persistance de la situation climatique, de nombreux projets de développement ont été initiés, notamment dans le cadre de l'aménagement hydro-agricole de la région (MONTOROI, 1990). En basse Casamance, les vallées alluviales ont été les bénéficiaires de cette politique. De nombreux barrages ont vu le jour et ont permis l'isolement des terres dégradées qu'il convient de réhabiliter. Cette réhabilitation suppose la maîtrise de la ressource eau, qui seule peut, en éliminant les éléments chimiques nocifs (sels, éléments acidifiants), générer une production agricole, en l'occurrence rizicole.

C'est dans ce souci de mieux valoriser les infrastructures existantes qu'un programme de recherche a été élaboré sur la vallée de DJIGUINOUM et a reçu un soutien financier de la CEE (ALBERGEL et al., 1991; MONTOROI et al., 1992). Il s'agissait de montrer que la riziculture est possible lorsque l'on adopte un schéma de gestion hydraulique rationnel. Devant les résultats probants obtenus, il est nécessaire de bien expliciter les mécanismes qui sont mis en jeu au niveau des sols afin d'envisager durablement leur utilisation agricole.

Les premières observations faites par LE BRUSQ et al. (1987) ont montré que des processus géochimiques nouveaux se sont développés dans cette vallée. Il semblerait que ces processus se soient révélés avec la construction récente du barrage anti-sel qui accentue la modification du régime hydrique des sols de mangrove. L'exondation prolongée pendant une partie de la saison sèche favorise la production d'acidité. Celle-ci se conjugue à de fortes teneurs en sels résultant de l'hypersalinisation du réseau hydrographique du fleuve Casamance. Des minéralisations originales sont apparues à la surface des sols, notamment dans la zone de raccordement avec le plateau.

Malgré la présence de l'ouvrage anti-sel, les sols restent en contact avec des eaux salées et acides plus ou moins diluées. C'est une eau de ce type que l'on se propose de concentrer par évaporation au laboratoire pour connaître son itinéraire géochimique. La comparaison avec des minéraux observés sur le terrain permettra de mieux définir les mécanismes géochimiques qui prévalent dans les sols de bas-fond, en particulier ceux qui régissent un élément tel que l'aluminium, omniprésent dans le paysage. Les observations actuelles montrent que cette dynamique se généralise aux autres vallées alluviales de basse Casamance, qu'elles soient aménagées ou non.

1. LIEU DU PRELEVEMENT

Le barrage anti-sel de DJILAKOUN retient, en saison des pluies, les eaux de ruissellement provenant du bassin versant de DJIGUINOUM. Celui-ci présente une superficie de 25.74 km² et se situe au nord-est de Ziguinchor, à environ 15 km, sur la rive droite du fleuve Casamance (entre 16° 15' et 16° 10' de latitude nord et entre 12° 39' et 12° 43' de longitude ouest). Les eaux de la retenue sont peu profondes (< 1 m) sur l'ensemble de la vallée.

Les sols de ce bas-fond sont en majorité sulfatés acides dans la partie méridionale. Ils conservent l'empreinte des anciennes submersions par les eaux marines, notamment dans l'axe du marigot.

Le prélèvement d'eau a été réalisé le 23 novembre 1990 à 50 m en amont du barrage de DJILAKOUN. Sur les huit jerricans en plastique de 20 l ayant servi au prélèvement, six ont été entreposés pendant 6 mois dans la chambre froide du laboratoire de Microbiologie du centre ORSTOM de Bel-Air avec l'assentiment de B. DREYFUS.

Pour contrôler l'évolution des paramètres physico-chimiques de cet eau avant son utilisation expérimentale, des mesures régulières (pH, conductivité électrique et potentiel redox) ont été effectuées sur un des jerricans restants maintenu à la température ambiante (tableau 1).

Tableau 1: Evolution temporelle des caractéristiques physico-chimiques de l'eau prélevée au barrage de DJILAKOUN et stockée au laboratoire

Date		pH	CE (dS/m)	E	E ZoBell (mV)
23/11/90	18h	3.0	6.6	504	205
	20h	3.1	6.7	504	225
24/11/90	9h	3.1	6.5	522	
30/11/90	10h	3.0	6.9	562	226
10/12/90	9h30	2.9	6.9	592	224
21/12/90		3.3	6.8	552	225
11/01/91		3.4	6.9	572	224
04/02/91	9h	3.5	7.0	552	226
25/02/91		2.9	6.7	575	226
25/03/91		3.4	7.0	568	228
02/05/91		2.9	7.2	547	225

On notera que le pH et la salinité n'ont pratiquement pas varié. Cette période de repos a permis la décantation des suspensions minérales et organiques.

2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'expérience s'est déroulée au laboratoire de géochimie du centre ORSTOM de Dakar et s'est inspirée d'une expérimentation similaire réalisée par M. CARN (1985) sur les eaux du lac de Guiers. Une partie du matériel a été réutilisé et le protocole expérimental adapté aux nouvelles conditions du milieu naturel.

2.1. Les bacs d'évaporation

Au début de l'expérimentation, le dispositif utilisé est le suivant:

- un bac extérieur rempli d'eau distillé,
- un bac intérieur disposé sur 4 supports tubulaires et rempli avec l'eau étudiée. Les faces internes sont recouvertes d'un film plastique destiné à recueillir les dépôts salins.

Les 2 bacs sont constitués en altuglass, les liquides étant maintenus au même niveau afin d'éviter d'éventuelles déformations.

Lorsque le niveau d'eau se situe à environ 10 cm du fond du bac, nous transvasons le bac intérieur dans un bac de section plus petite afin de remonter le niveau d'eau et d'étaler le spectre des sels précipités sur le film plastique (tableau 2).

Tableau 2: Caractéristiques des différents bacs d'évaporation utilisés au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

	Long. (cm)	Larg. (cm)	Section (cm ²)	Haut. (cm)	Niveau		Volume	
					initial (cm)	final (cm)	initial (l)	final (l)
BAC 1	98.7	33.7	3326.2	49.8	25.2	10.3	83.8	34.4
BAC 2	29.75	29.1	865.7	50.0	39.7	13.7	34.4	11.9
BAC 3	19.8	19.4	384.1	50.5	30.9	19.2	11.9	7.4
BAC 4	11.0	11.0	121.0	70.0	61.0	0	7.4	0

2.2 Les accessoires

Pour recréer des conditions proches de la réalité, nous avons mis en place:

- un ventilateur électrique permettant de réguler la demande évaporatoire,
- une pompe électrique immergée afin de brasser l'eau du bac intérieur,
- une pompe électrique thermorégulatrice, disposée dans l'eau du bac extérieur, pour assurer sa mise en circulation à température constante,
- une petite boîte témoin en plastique servant à la collecte des poussières atmosphériques,

Au cours de l'expérimentation, nous avons procédé à différents tests pour juger de l'efficacité des différents appareillages. C'est ainsi que la pompe du bac intérieur a été arrêtée au bout d'un certain temps, car elle occasionnait des perturbations néfastes au niveau du film plastique. La température du bac extérieur variant très peu au cours de l'expérience, sa régulation thermique a été abandonnée. Seule la ventilation a été maintenue malgré les fréquentes coupures de courant. De juin à novembre (saison des pluies), le laboratoire a été climatisé.

3. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

3.1. Le protocole d'échantillonnage

Le bac intérieur a été rempli initialement avec 83.82 l. L'eau est environ 3 fois plus concentrée que l'eau la plus diluée rencontrée dans la retenue de DJILAKOUN en 1990..

Des échantillons d'eau ont été régulièrement prélevés, à l'aide d'une pipette réglée à 5 ml, en différents points du plan d'eau. A chaque opération, deux flacons en plastique de 60 ml sont collectés et stockés au réfrigérateur. Ces échantillons sont destinés aux analyses chimiques. La prise de flacons a été réduite à l'unité à partir d'EVA 12. A certaines dates d'échantillonnage, un prélèvement supplémentaire (10 ou 20 ml) a été réalisé pour une analyse isotopique.

Le tableau 3 indique les volumes d'eau avant et après l'échantillonnage et les facteurs de concentration volumiques correspondants.

3.2. Le protocole de mesures

Dans le bac intérieur, plusieurs paramètres ont été mesurés journalièrement par un technicien du laboratoire (Lamine SAGNA). Il s'agit:

- du niveau du plan d'eau à l'aide d'une vis micrométrique permettant des lectures au 1/10 mm,
- du pH à l'aide d'un pH-mètre TACUSSEL,
- de la conductivité électrique à l'aide d'un conductivimètre HANNA,

**Tableau 3: Caractéristiques de l'échantillonnage
de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992**

Date	N° échant.	Vol. avant prélèvement (l)	Vol. prélevé (l)	Vol. résiduel (l)	Facteur de concentration volumique
Bac 1:					
02/05/91	EVA1	83.820	0.120		1.000
01/06/91	EVA2	74.863	0.110	74.753	1.120
01/07/91	EVA3	63.504	0.110	63.394	1.318
05/08/91	EVA4	46.540	0.120	46.420	1.795
17/08/91	EVA5	37.776	0.110	37.666	2.206
27/08/91	EVA6	34.519	0.110	34.409	2.407
Bac 2:					
14/10/91	EVA7	23.856	0.110	23.746	3.472
28/10/91	EVA8	20.159	0.130	20.029	4.090
18/11/91	EVA9	15.472	0.130	15.342	5.294
16/12/91	EVA10	11.996	0.110	11.886	6.771
Bac 3:					
17/12/91	EVA11	11.800	0.110	11.690	6.821
03/01/92	EVA12	8.251	0.060	8.191	9.663
19/01/92	EVA13	7.579	0.060	7.519	10.444
26/01/92	EVA14	7.446	0.060	7.386	10.546
Bac 4:					
07/02/92	EVA15	7.151	0.060	7.091	10.893
24/02/92	EVA16	6.923	0.060	6.863	11.157
09/03/92	EVA17	6.689	0.060	6.629	11.447
19/03/92	EVA18	6.439	0.060	6.379	11.785
27/03/92	EVA19	6.246	0.060	6.186	12.036
05/04/92	EVA20	6.004	0.060	5.944	12.401
19/04/92	EVA21	5.832	0.060	5.772	12.639
25/04/92	EVA22	5.718	0.060	5.658	12.758
10/05/92	EVA23	5.457	0.060	5.397	13.228
23/05/92	EVA24	5.146	0.060	5.086	13.873
03/06/92	EVA25	4.911	0.060	4.851	14.368
13/06/92	EVA26	4.570	0.060	4.510	15.251
22/06/92	EVA27	4.177	0.060	4.117	16.467
30/06/92	EVA28	3.971	0.060	3.911	17.072
09/07/92	EVA29	3.796	0.060	3.736	17.590
23/07/92	EVA30	-	0.060	-	-
31/07/92	EVA31	-	0.060	-	-
08/08/92	EVA32	-	0.060	-	-
31/08/92	EVA33	-	0.060	-	-
11/09/92	EVA34	-	0.060	-	-
19/10/92	EVA35	-	0.060	-	-

- de la salinité chlorurée sodique à l'aide d'un réfractomètre,
- du potentiel d'oxydo-réduction (Eh) à l'aide d'un appareil KNICK (modèle 651-2): celui-ci est muni d'une électrode combinée Pt/KCl saturé/Ag/AgCl comprenant une électrode de référence (Ag/AgCl) associée à une électrode au platine (Pt) et un électrolyte de remplissage (KCl3M + AgCl).

Une mesure de référence est effectuée dans la solution de ZoBell dont la composition est la suivante:

- . 3.33 10⁻³ mole /l de ferrocyanide de potassium (K₄Fe(CN)₆)
- . 3.33 10⁻³ mole /l de ferricyanide de potassium (K₃Fe(CN)₆)
- . 0.10 mole/l de KCl,

- de la température à l'aide d'un thermomètre numérique QUICK,
- du degré hygrométrique grâce à deux hygromètres à cheveux, dont on a pris une valeur moyenne.

L'étalonnage des différents appareils a été réalisée préalablement et ensuite régulièrement. Des solutions tampon à pH 4 et pH 7, maintenues au frais, ont été utilisées.

4. RESULTATS

4.1. Quelques observations préliminaires

- ce type d'expérimentation comporte quelques difficultés de mise en oeuvre, notamment le maintien du film plastique le long des parois du bac. Plusieurs essais ont été nécessaires pour trouver le meilleur dispositif évitant le piégeage de l'eau entre le film et la paroi ou les remontées hydrostatiques du film à la surface de l'eau.

- dès le début de l'expérimentation, sont apparus des dépôts bruns rouille au fond du bac 1. Ceux-ci constituent des volumes de taille millimétrique ayant un aspect filamenteux plus ou moins agrégé. Ils ont été recueillis par grattage des parois du bac séché, le changement de bac étant intervenu, le 27/8/1991, après l'échantillonnage EVA6. Une partie de la collecte (1.7053 g en tout) a été envoyée au laboratoire de Sédimentologie de Strasbourg pour détermination analytique par diffraction RX.

Les premiers résultats indiquent la présence de quartz, d'halite, de gypse et également de jarosite associés à des composés amorphes d'hydroxydes de fer.

- le 3ème bac est entré en fonction à compter du 16/12/1991, après l'échantillonnage EVA10. Le 26/1/1992, ce bac a subi des dommages qui ont nécessité un transvasement.

- le 4ème bac est devenu opérationnel le 26/1/1992 après l'échantillonnage EVA 14. La fin de l'expérimentation s'est déroulée dans des conditions satisfaisantes. Le 29/1, on observe le début d'un développement algair verdâtre. A partir de EVA 30, l'eau du bac prend une coloration jaune.

- les mesures ont été arrêtées le 28/9/1992 et l'expérimentation a été définitivement terminée avec la collecte du dernier échantillon EVA 35. Le dépôt salin résiduel a été prélevé pour une détermination aux rayons X. Un micro-prélèvement a été réalisé dans la saumure restante pour une ultime analyse (EVA 36).

4.2. Evolution temporelle des paramètres mesurés

Le tableau 4 donne les différents paramètres physico-chimiques mesurés juste avant la prise d'échantillons. Leur évolution temporelle est visualisée sur les figures 1, 2, 3, 4, 5 et 6.

Ces graphiques appellent quelques commentaires:

. les pics importants, que l'on observe pour l'évaporation journalière, sont à mettre en relation avec les périodes où le laboratoire est climatisé. L'évaporation moyenne au cours de l'expérimentation est de 1.71 mm/j.

Tableau 4: Paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

N°	pH	CE (dS/m)	T (°C)	Hm (%)	E (mV)	E ZoBell (mV)	Salinité (g/l NaCl)
EVA1	3.0	6.2	27.3	82	590	223	0.4
EVA2	3.1	8.1	25.6	74	579	235	0.5
EVA3	2.9	9.5	27.3	66	548	244	0.6
EVA4	2.7	12.7	25.4	64	569	240	0.8
EVA5	2.7	15.0	20.1	59	567	248	1.0
EVA6	2.6	16.2	27.6	69	577	239	1.1
EVA7	2.5	24.8	23.4	64	521	245	1.65
EVA8	2.4	31.0	23.2	59	516	248	2.15
EVA9	2.2	45.7	23.4	61	512	247	3.25
EVA10	2.1	53.7	23.9	58	507	245	3.9
EVA11	2.2	41.5	25.3	62	513	245	2.7
EVA12	2.0	60.1	25.3	55	506	243	4.6
EVA13	1.8	65.1	19.3	70	508	248	4.85
EVA14	1.9	66.2	25.2	71	507	249	4.9
EVA15	1.8	68.8	25.0	73	507	254	5.1
EVA16	1.9	70.5	23.9	82	502	260	5.5
EVA17	1.8	73.6	24.8	65	493	258	5.7
EVA18	1.8	78.2	24.0	64	500	263	6.05
EVA19	1.9	80.8	24.9	68	499	262	6.2
EVA20	1.9	80.2	24.1	71	497	267	6.6
EVA21	1.9	87.8	25.9	71	492	303	6.9
EVA22	1.9	88.1	25.1	77	492	266	6.7
EVA23	1.8	97.9	26.9	70	490	276	7.55
EVA24	1.9	101.7	24.8	76	484	281	8.15
EVA25	1.7	114.4	28.1	73	493	287	8.95
EVA26	1.8	109.5	27.2	62	491	296	8.8
EVA27	1.7	131.2	28.2	61	492	301	-
EVA28	1.2	140.3	28.2	66	491	305	-
EVA29	1.4	143.6	27.3	63	491	310	-
EVA30	1.3	153.6	28.8	59	481	303	13.2
EVA31	1.2	155.1	28.7	66	486	307	13.4
EVA32	1.1	163.3	29.8	57	490	310	14.0
EVA33	0.5	190.8	29.7	61	487	303	-
EVA34	0.5	199.9	29.7	61	488	299	-
EVA35	-	-	-	-	-	-	-

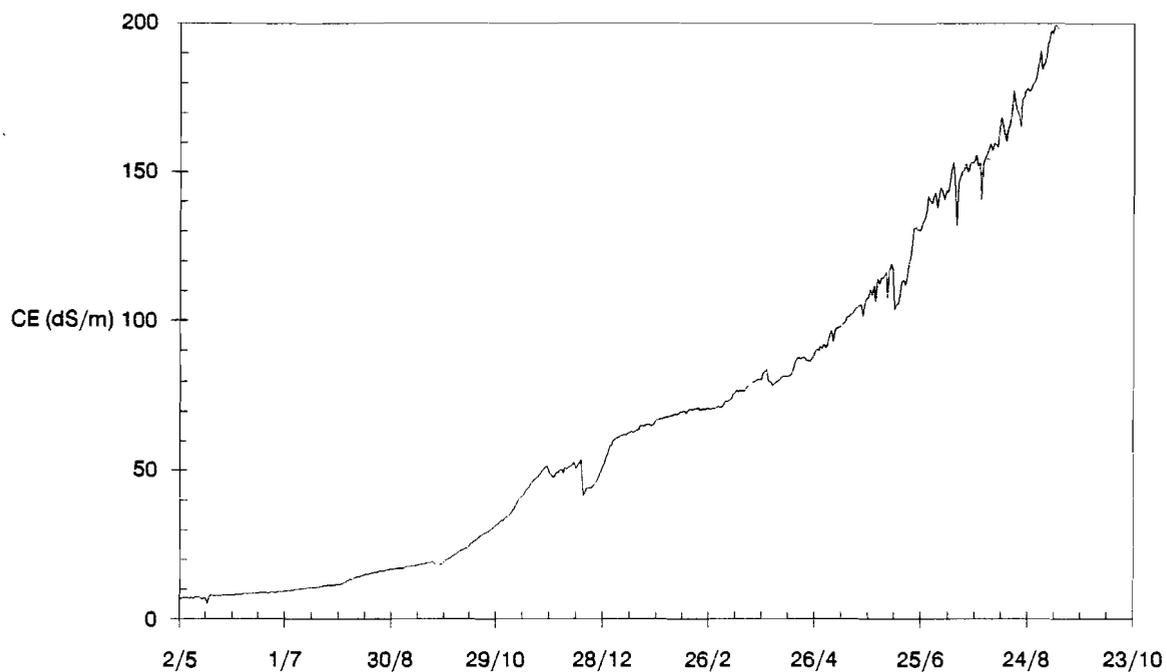


Figure 1: Conductivité électrique journalière au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

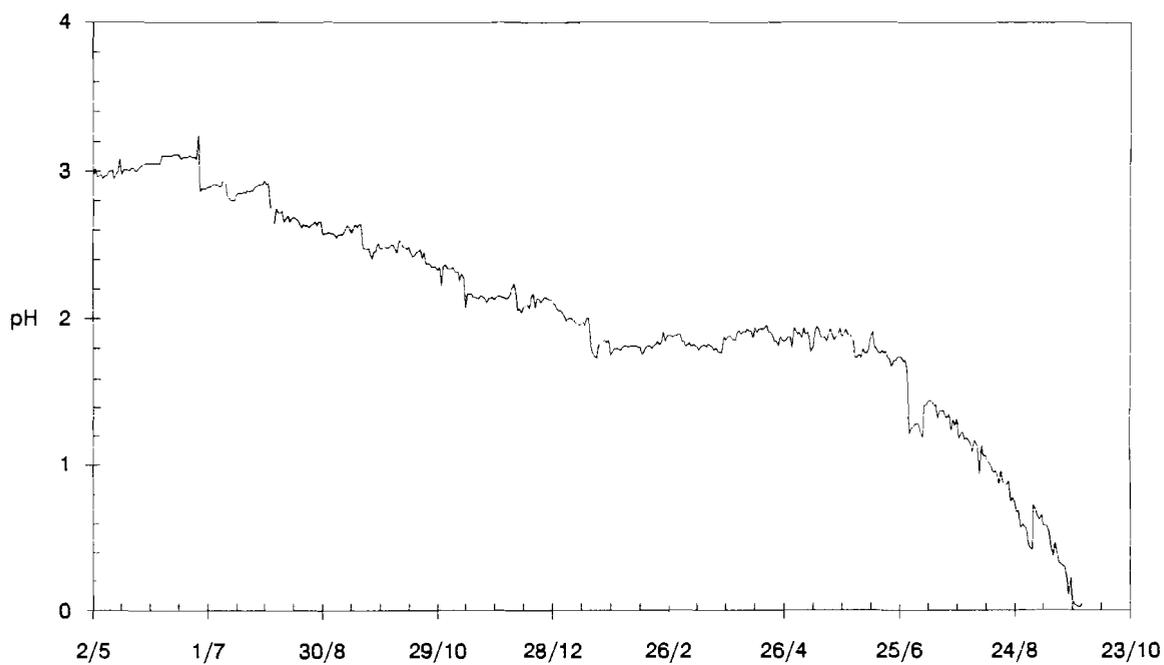


Figure 2: pH journalier au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

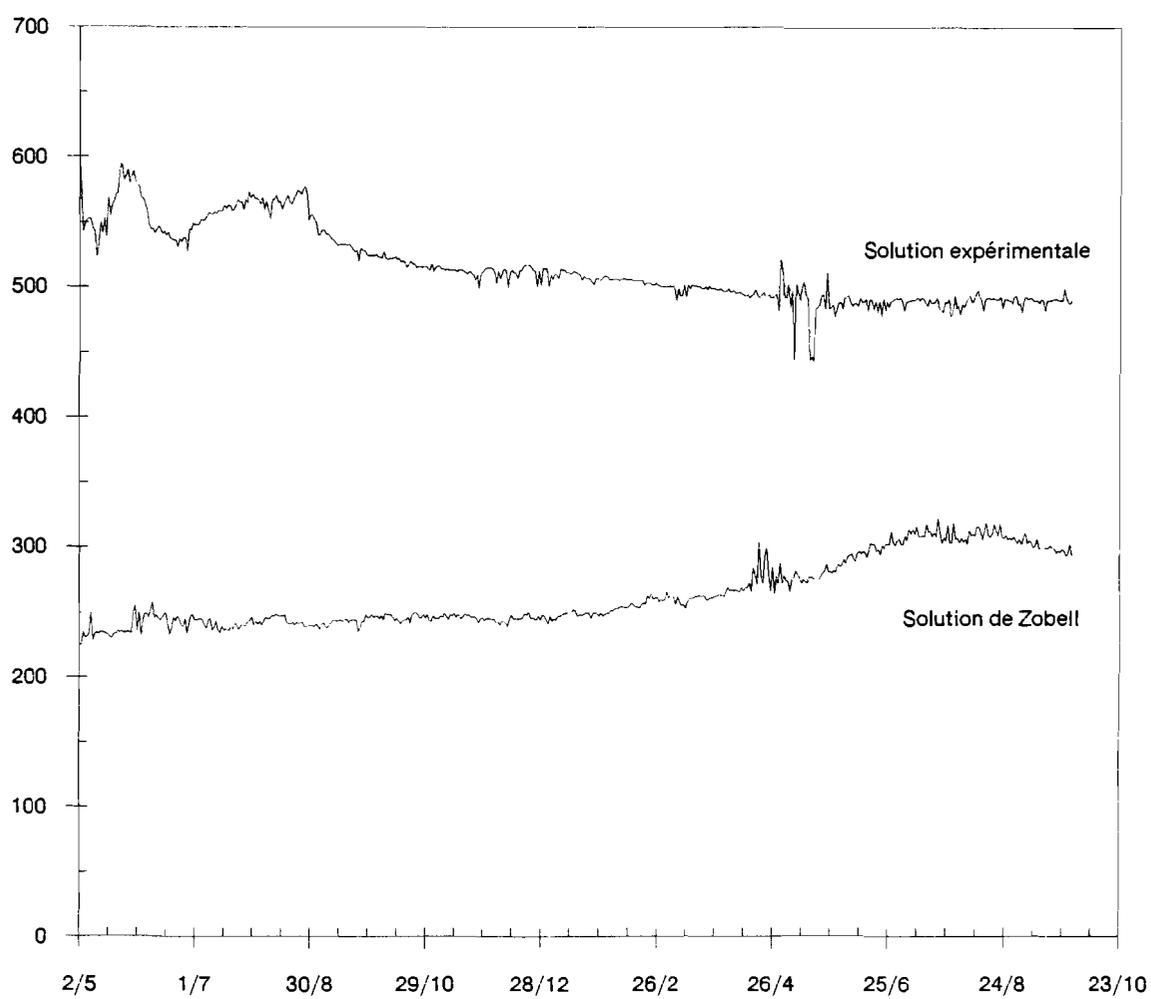
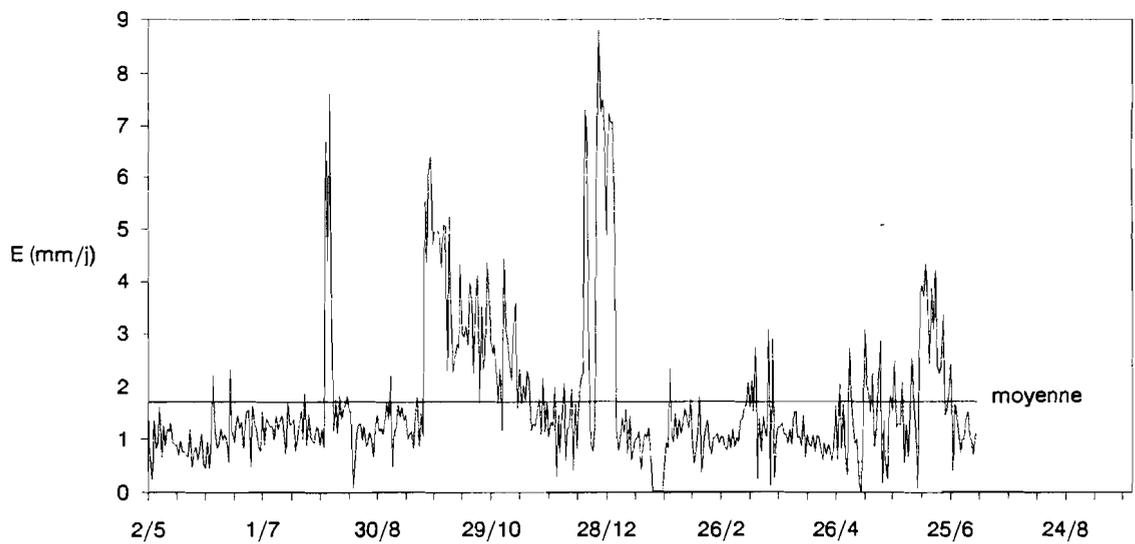
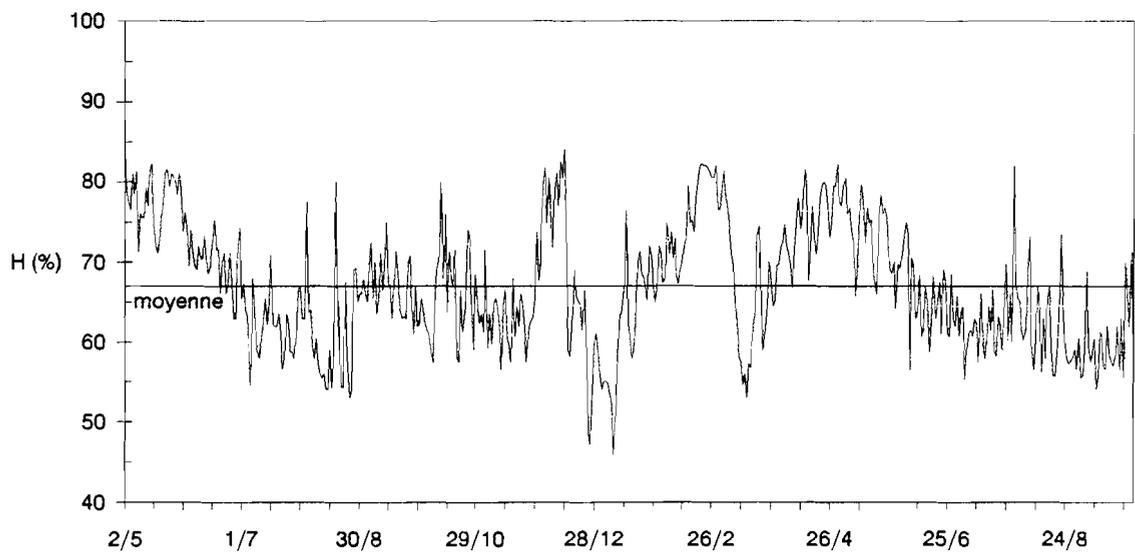
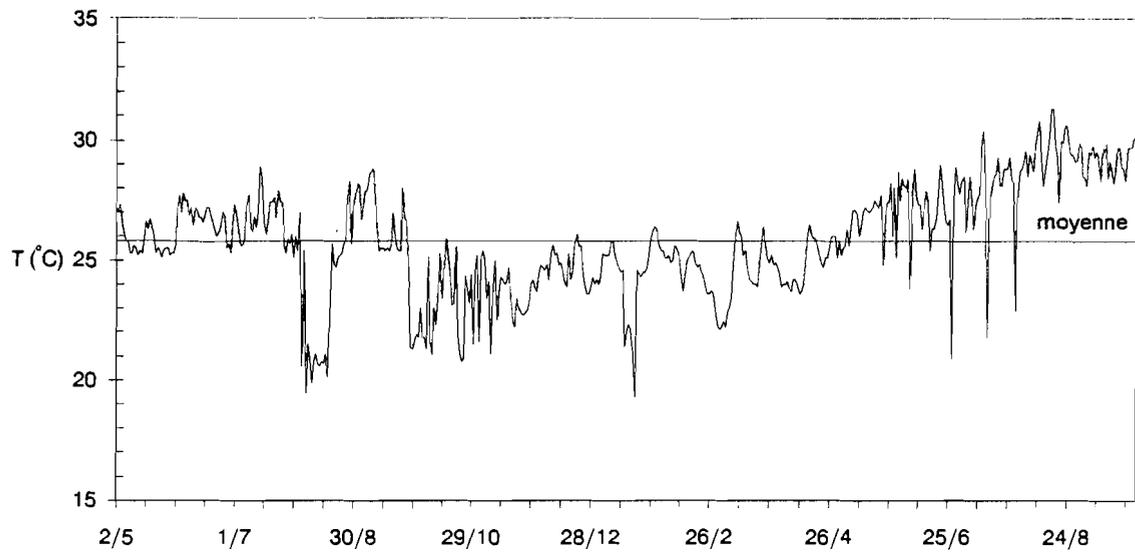


Figure 3: Potentiels journaliers au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992



Figures 4, 5 et 6: Température, humidité relative et évaporation journalières au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

. l'humidité relative journalière varie entre 45 et 85 %, sa valeur moyenne étant de 67 %.

. la température journalière est comprises entre 19 °C et 29 °C: les valeurs oscillent autour d'une valeur moyenne de 25.8 °C, les variations étant souvent induites par l'air conditionné.

. la courbe de concentration des eaux montre des déformations peu orthodoxes; il s'agit sans doute d'un défaut dans le dispositif de maintien du film plastique qui entraîne une différentiation dans le processus de concentration des eaux; lors du deuxième transvasement (bac 2-bac 3), le décrochement de la courbe est particulièrement notable,

. après une courte phase où le pH reste légèrement supérieur à 3 (dissolution de particules en suspension ?), la courbe du pH accuse une allure générale décroissante, marquée par de légères variations; elle se stabilise, après plus de six mois, à une valeur voisine de 1.8-1.9 et puis, chute brutalement pour atteindre des valeurs proches de zéro.

. la courbe de potentiel relative à la solution fluctue autour de 560 mV en début d'expérimentation, puis décroît régulièrement pour se stabiliser à une valeur voisine de 490 mV. On note une dérive significative de la mesure de potentiel dans la solution de ZoBell en fin d'expérience.

4.3. Calcul du potentiel d'oxydo-réduction

La mesure lue sur le Eh-mètre et exprimée en mV n'indique pas directement le potentiel d'oxydo-réduction (Eh) de la solution. Elle correspond à une force électromotrice (fem) globale comprenant les potentiels de deux demi-piles ou électrodes:

- la demi-pile de référence Ag/AgCl, KCl saturé
- la demi-pile solution/Pt.

et s'exprime par l'expression:

$$E \text{ mesuré} = E \text{ solution/Pt} + E \text{ Ag/AgCl, KCl saturé}$$

4.3.1. Détermination du potentiel redox au pH de la solution

En tenant compte du signe du potentiel de la demi-pile de référence, le Eh de la solution est donné par la relation:

$$Eh \text{ solution} = E \text{ solution/Pt} = E \text{ mesuré} - (- E \text{ Ag/AgCl, KCl saturé}) \quad (1)$$

La solution de ZoBell permet de déterminer le potentiel de l'électrode de référence Ag/AgCl. D'après (1), on déduit:

$$\begin{aligned} Eh \text{ ZoBell} &= E' \text{ ZoBell} - (- E \text{ Ag/AgCl, KCl saturé}) \\ \text{et } E \text{ Ag/AgCl, KCl saturé} &= Eh \text{ ZoBell} - E' \text{ ZoBell} \end{aligned} \quad (2)$$

Avec (1) et (2), il vient:

$$Eh \text{ solution} = E \text{ mesuré} + Eh \text{ ZoBell} - E' \text{ ZoBell}$$

Les valeurs de la solution de ZoBell dépendent de la température (t), selon l'expression obtenue par NORDSTROM (1977) et valable entre 10 et 55°C:

$$Eh \text{ ZoBell} = 0.42993 - 2.57 \cdot 10^{-3} (t-25)$$

où Eh est exprimé en volt et t en degré Celsius.

Les résultats du calcul du Eh de la solution sont donnés dans le tableau 5. L'évolution temporelle de ce paramètre est visualisée sur la figure 7.

Tableau 5: Calcul des potentiels d'oxydo-réduction sur les échantillons d'eau de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

N°	E (mV)	E ZoBell (mV)	Eh ZoBell (mV)	Eh solution (mV)	Eh pH7 (mV)	pe	pe+pH
EVA1	590	223	424	791	552	13.4	16.3
EVA2	579	235	428	772	539	13.0	16.1
EVA3	548	244	424	728	485	12.3	15.2
EVA4	569	240	429	758	500	12.8	15.5
EVA5	567	248	443	762	505	12.9	15.5
EVA6	577	239	423	761	503	12.9	15.5
EVA7	521	245	434	710	443	12.0	14.5
EVA8	516	248	435	703	427	11.9	14.2
EVA9	512	247	434	699	412	11.8	14.0
EVA10	507	245	433	695	403	11.7	13.8
EVA11	513	245	429	697	410	11.8	13.9
EVA12	506	243	429	692	397	11.7	13.7
EVA13	508	248	445	705	394	11.9	13.7
EVA14	507	249	429	687	383	11.6	13.5
EVA15	507	254	430	683	376	11.5	13.4
EVA16	502	260	433	675	370	11.4	13.2
EVA17	493	258	430	665	359	11.2	13.1
EVA18	500	263	433	670	363	11.3	13.1
EVA19	499	262	430	667	363	11.3	13.1
EVA20	497	267	432	662	362	11.2	13.1
EVA21	492	303	428	617	315	10.4	12.3
EVA22	492	266	430	656	351	11.1	12.9
EVA23	490	276	425	639	330	10.8	12.6
EVA24	484	281	430	633	330	10.7	12.6
EVA25	493	287	422	628	317	10.6	12.3
EVA26	491	296	424	619	311	10.5	12.3
EVA27	492	301	422	613	300	10.3	12.1
EVA28	491	305	422	608	265	10.3	11.5
EVA29	491	310	424	605	275	10.2	11.6
EVA30	481	303	420	598	261	10.1	11.4
EVA31	486	307	420	599	254	10.1	11.3
EVA32	490	310	418	598	246	10.1	11.2
EVA33	487	303	418	602	215	10.2	10.6
EVA34	488	299	418	607	224	10.3	10.8
EVA35	-	-	-	-	-	-	-

4.3.2. Détermination du potentiel redox à un pH de référence

Les conditions de pH variant d'une solution à l'autre, il est préférable de rapporter toutes les valeurs de Eh à un pH de référence fixé à 7.

D'après LINDSAY (1979), le potentiel redox peut être exprimé en termes de pe, qui est égal à $-\log$ (activité en électrons), selon la relation:

$$Eh = 59.2 pe \quad (3)$$

Dans tout milieu aqueux en équilibre avec l'atmosphère, LINDSAY (1979) montre que:

$$pe + pH = \text{constante}$$

Donc, pour une solution à un pH donné et une solution de référence à pH 7, on a:

$$pe_7 + pH_7 = pe + pH = \text{cte} \quad (4)$$

Avec (3) et (4), on effectue le calcul suivant: $Eh_7 - Eh = 59.2 (pe_7 - pe) = 59.2 (pH - pH_7)$ et on déduit l'expression du Eh à pH 7:

$$Eh_7 = Eh + 59.2 (pH - 7)$$

Les résultats du calcul du Eh de la solution sont donnés dans le tableau 5. L'évolution temporelle de ce paramètre est visualisée sur la figure 8.

Sur l'ensemble de l'expérimentation le Eh de la solution décroît régulièrement de 750 à 600 mV. Les mesures réalisées avec des pH de plus en plus faibles peuvent être entachées d'une certaine imprécision qui expliquerait en partie cette décroissance. Les variations observées en début d'expérience peuvent être le fait d'une activité biologique. On note une stabilisation des valeurs vers la fin.

Les valeurs de pe, qui varient de 13.4 à 10.3, montrent que le milieu est resté bien aéré même si on observe une légère tendance à la réduction. Elles sont sensiblement différentes des valeurs théoriques que l'on peut obtenir, pour une eau au contact de l'air, par la relation régissant l'équilibre redox H_2O/O_2 :

$$pe = 20.75 - pH + 1/4 \log p(O_2)$$

La pression partielle de O_2 étant égale à 0.2 atm, cette équation conduit à:

$$pe = 20.58 - pH$$

Pour des pH compris entre 3 et 1, les valeurs de pe seraient comprises entre 17.5 et 19.5, donc bien supérieures aux valeurs mesurées.

Pour un pH donné, une diminution du pe implique une diminution de la pression partielle de O_2 , cette diminution de pression pouvant s'expliquer par une activité biologique plus importante. Cependant, les différences observées sont surtout imputables au fait que l'équilibre redox global des eaux naturelles n'est que rarement atteint (MICHARD, 1989).

La mesure du Eh d'un milieu naturel présente une signification quantitative limitée mais permet par l'étude des équilibres d'oxydo-réduction de prédire son évolution (MICHARD, 1989).

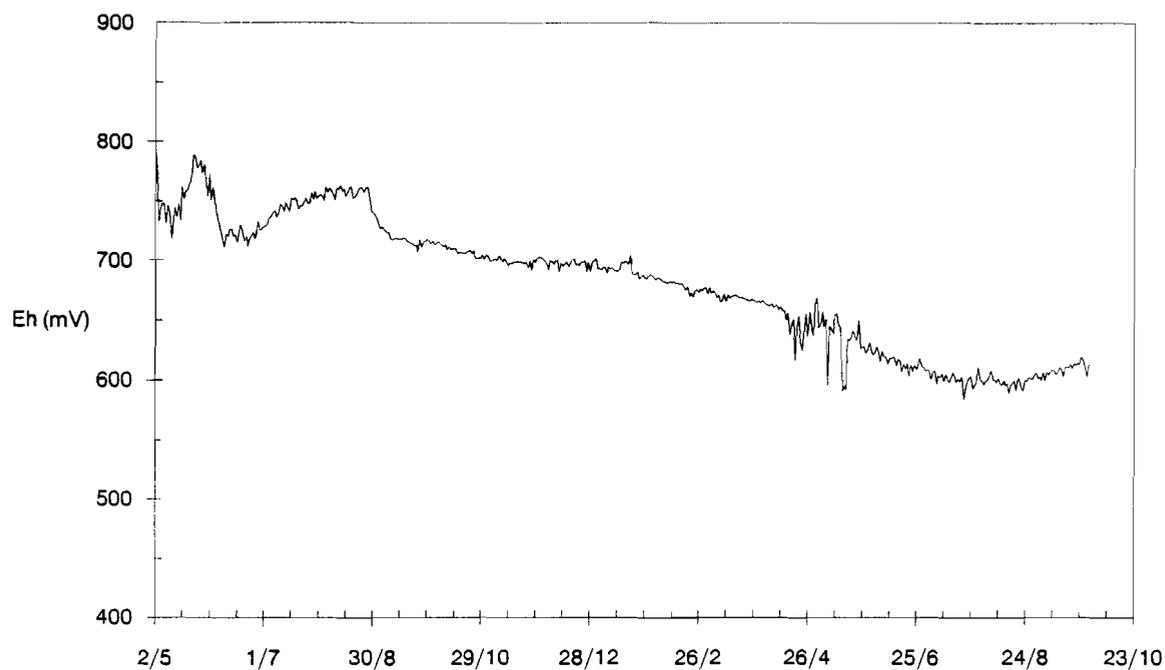


Figure 7: Eh journaliers au pH de la solution au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992



Figure 8: Eh journaliers pour une solution à pH=7 au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

4.4. Evolution de la composition chimique

Les concentrations totales des échantillons d'eau, exprimées en $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$, en mol L^{-1} et en g L^{-1} , sont données en annexe.

Plusieurs paramètres caractéristiques, tels que la demi-somme des concentrations ioniques totales (C, exprimée en $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$), la charge minérale dissoute (CD, exprimée en g L^{-1}) et la force ionique (I, exprimée en mol L^{-1}), ont été calculés.

Les relations statistiques qui lient ces paramètres à la conductivité électrique (CE) ont été déterminées (tableau 6). Ces relations, obtenues pour des CE < 200 dS/m, n'ont qu'une valeur indicatrice car elles ne tiennent pas compte des paires d'ions formées au cours de la concentration. La prise en compte de ces paires d'ions est d'autant plus importante que la solution est plus concentrée.

Les valeurs de CE considérées sont:

- . soit les mesures à 25 °C effectuées directement dans le bac,
- . soit les mesures à 20 °C réalisées au laboratoire au cours des analyses chimiques: ces mesures ont été ramenées à 25 °C en les multipliant par un facteur correctif de 1.112 (RICHARDS, 1954).

Tableau 6: Relations statistiques $C=f(CE)$, $CD=f(CE)$ et $I=f(CE)$

	Valeurs CE	
	laboratoire (n=35)	bac évaporatoire (n=34)
$C=f(CE)$	$C = 5.459 CE^{1.216}$ ($r^2=0.987$)	$C = 8.148 CE^{1.112}$ ($r^2=0.997$)
$I=(CE)$	$I = 0.0071 CE^{1.206}$ ($r^2=0.988$)	$I = 0.0105 CE^{1.104}$ ($r^2=0.997$)
$CD=f(CE)$	$CD = 0.325 CE^{1.208}$ ($r^2=0.987$)	$CD = 0.482 CE^{1.106}$ ($r^2=0.997$)

C représente la demi-concentration ionique totale ($C=1/2\text{Sm}_i$): m_i (concentration de l'ion i) et C sont exprimés en $\text{mmol}_e \text{L}^{-1}$,
 CD la charge minérale dissoute totale ($CD=\text{Sm}_i$): m_i (concentration de l'espèce chargée ou neutre i) et CD sont exprimés en g L^{-1} ,
 I la force ionique ($I=1/2\text{Sm}_i z_i^2$): m_i (concentration de l'ion i de valence z_i) et C sont exprimés en mol L^{-1} .

Les figures 9, 10 et 11 visualisent les courbes obtenues. On notera une bonne concordance entre les deux séries de courbes pour des CE < 100 dS/m, l'écart entre les valeurs de CE ne dépassant pas 3.5 dS/m. Au delà de 100 dS/m, cet écart devient significatif et s'accroît au fur et à mesure de la concentration. La différence peut s'expliquer:

- . soit par la dérive d'une des deux électrodes de conductivité électrique pour de fortes CE (le conductivimètre utilisé pour les mesures bac est calibré pour des CE < 200 dS/m),
- . soit par le facteur correctif de température pris en considération pour convertir les mesures de laboratoire faites à 20 °C en mesures standard à 25 °C: ce coefficient n'est peut-être pas adapté aux fortes valeurs de CE.

On notera que les relations obtenues avec les mesures du bac sont très voisines de celles calculées sur 58 échantillons d'eau de surface, les valeurs de CE étant inférieures à < 65 dS/m.

$$C = 8.116 CE^{1.106} \quad (r^2=0.981)$$

$$I = 0.0115 CE^{1.064} \quad (r^2=0.979)$$

$$CD = 0.474 CE^{1.105} \quad (r^2=0.981)$$

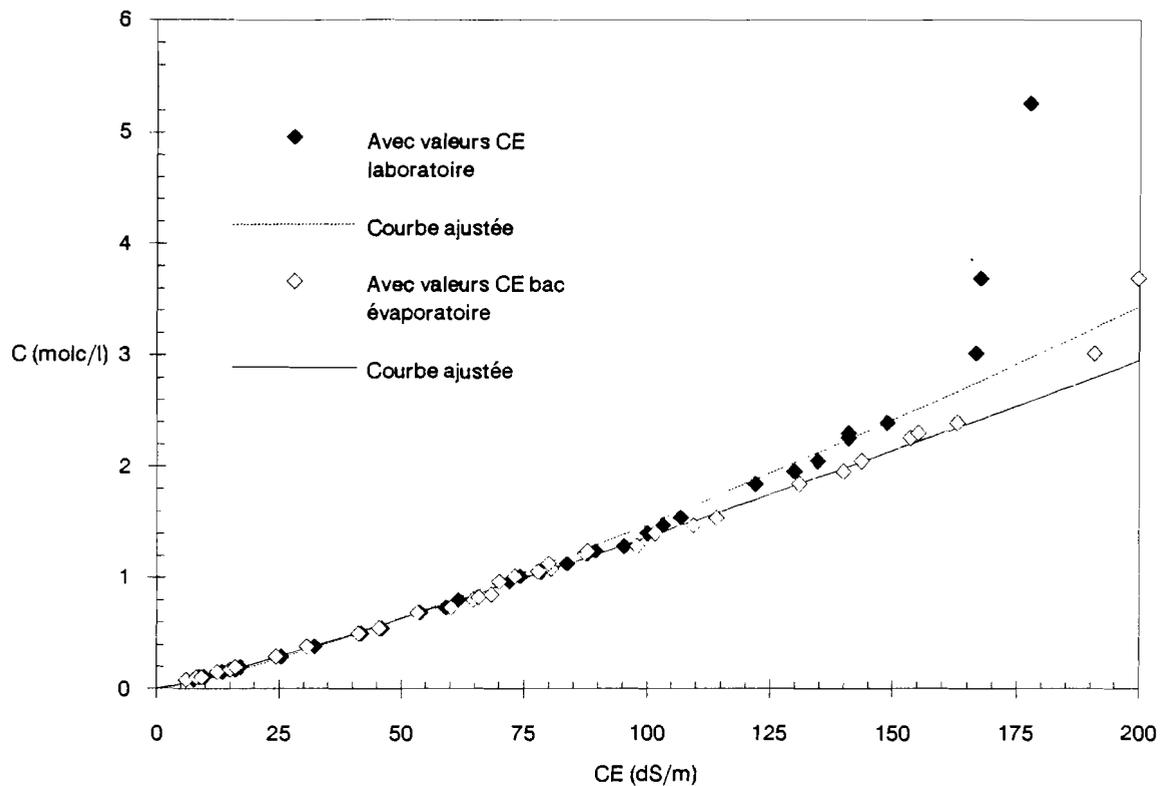


Figure 9: Relation concentration ionique - CE au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

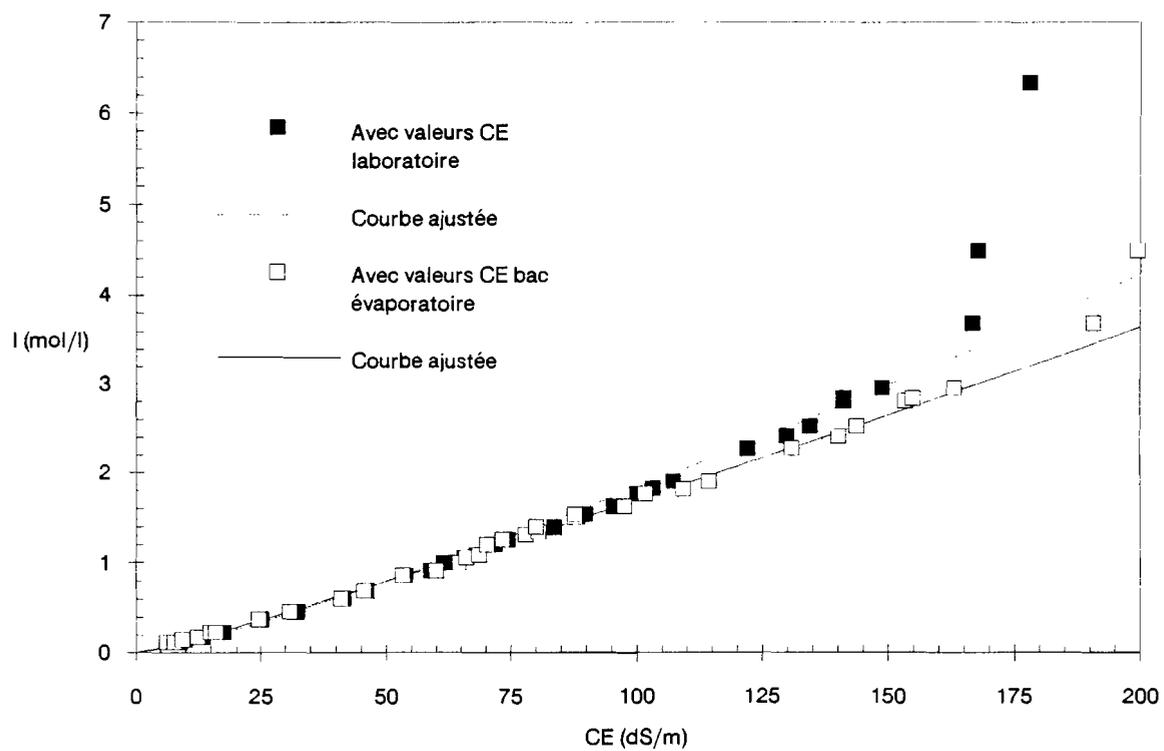


Figure 10: Relation force ionique - CE au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

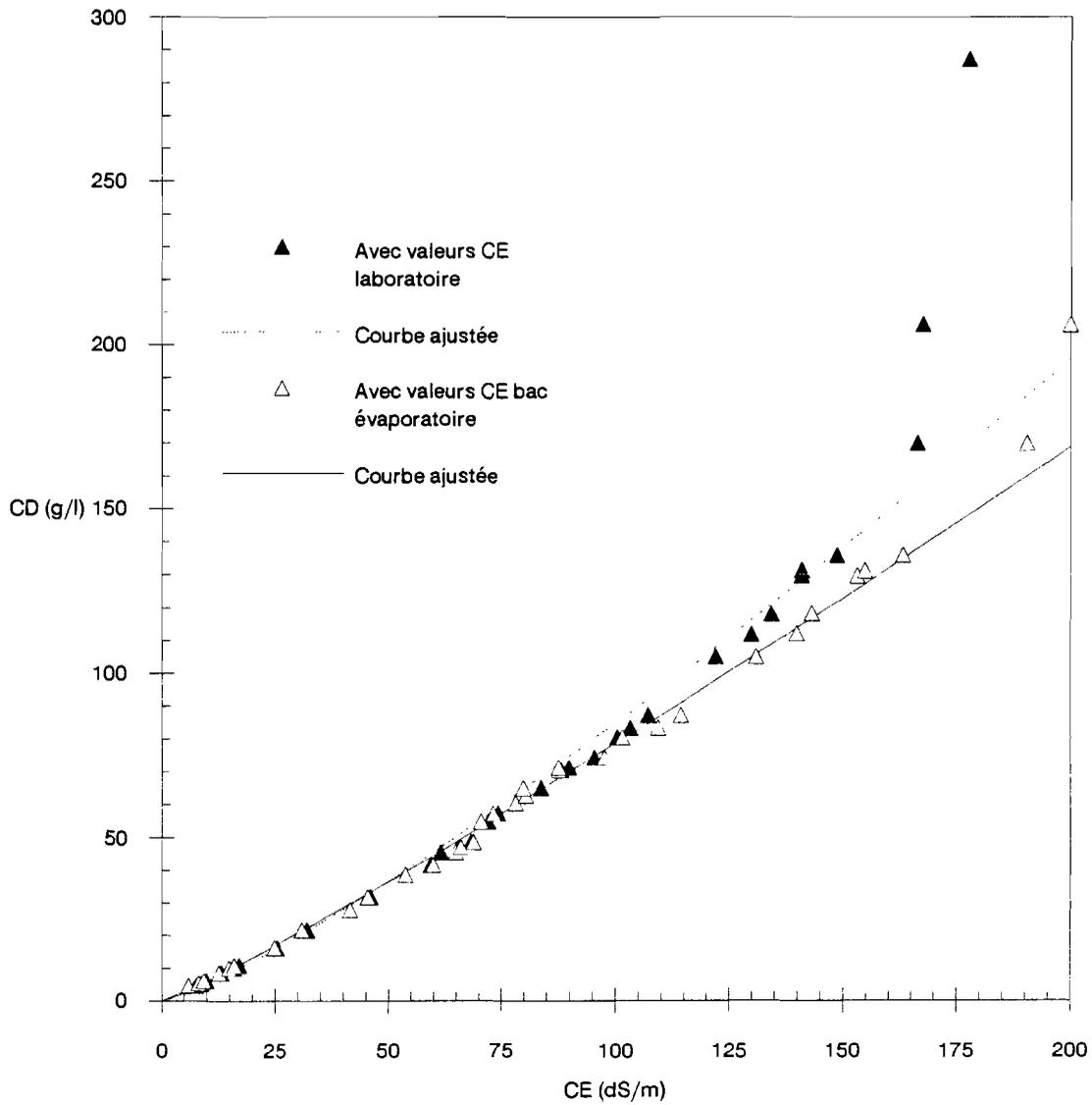


Figure 11: Relation charge minérale dissoute - CE au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

Les figures 12 et 13 indiquent l'évolution de la composition chimique, exprimée en concentration ionique totale, en fonction du facteur de concentration (F_c) de la solution.

La figure 12 est relative au facteur de concentration volumique qui a été estimé de EVA 30 à EVA 35 en considérant une évaporation journalière moyenne de 1.75 mm/j.

Le chlore, qui est l'élément chimique le plus conservatif, a été retenu pour déterminer le facteur de concentration de la figure 13.

Ces deux figures appellent quelques commentaires:

- les ions Na^+ , Mg^{++} , K^+ et Cl^- se concentrent régulièrement durant toute l'expérience: leur courbe de concentration sont parallèles,
- la concentration de l'ion Al^{+++} est également régulière, la pente étant légèrement moins forte,
- l'ion Ca^{++} se concentre dans un premier temps, puis à partir d'EVA 21 sa concentration diminue indiquant qu'une partie du Ca^{++} est consommé dans la formation d'un minéral,
- bien qu'elle reste ascendante, la courbe de concentration de l'ion SO_4^- subit une légère inflexion, également à partir de l'échantillon EVA 21,
- l'ion Fe^{+++} voit sa concentration diminuer au tout début de l'expérience, ce qui correspondrait aux précipités rouille observés dans le bac 1; ensuite, sa concentration est régulière avec une très légère inflexion au voisinage d'EVA 21,
- la concentration en NO_3^- est faible et fluctuante jusqu'à EVA 12 et semble correspondre à la pente plus accusée que l'on observe pour l'ion NH_4^+ : cette concomitance peut s'expliquer par l'activité biologique (bactéries dénitrifiantes?) qui transforme de la matière et en produit; ensuite ces deux ions se concentrent suivant une courbe parallèle aux autres éléments ce qui pourrait s'interpréter comme un arrêt de l'activité biologique,
- la silice est consommée jusqu'à EVA 6 (bac1), puis sa teneur augmente régulièrement pour rejoindre la pente de concentration des autres éléments à partir d'EVA 11.

Ces observations semblent indiquer la formation de minéraux sulfatés contenant du calcium, de l'aluminium et du fer. Cependant, la formation de paires d'ions dans ce milieu évaporitique doit être prise en compte pour mieux interpréter l'évolution chimique de cet eau.

Les figures 14 et 15 indiquent la composition anionique et cationique des échantillons d'eau et les faciès chimiques des solutions initiale et finale: pour les anions, on observe bien la diminution du pourcentage d'ion sulfate avec pour corollaire l'accroissement du taux d'ion chlorure. Pour les cations, l'ion calcium suit la même évolution que l'ion sulfate; les taux d'ions magnésium, sodium, potassium et aluminium se maintiennent; la baisse du pH au cours de l'expérimentation se traduit par l'apparition d'un pourcentage significatif de protons.

Le diagramme RX des sels précipités à la fin de l'expérimentation a été déterminé au laboratoire de minéralogie de l'ORSTOM-Bondy et est donné en annexe. Il fait ressortir la formation de minéraux chlorurés (halite, carnallite et bischofite) et sulfatés (gypse, rozenite, starkeite, hexahydrate, alunogène). Devant les fortes teneurs en halite et gypse, la détermination des autres minéraux est peu aisée. Les raies à 6.47 et 12.95 n'ont pas été explicitées.

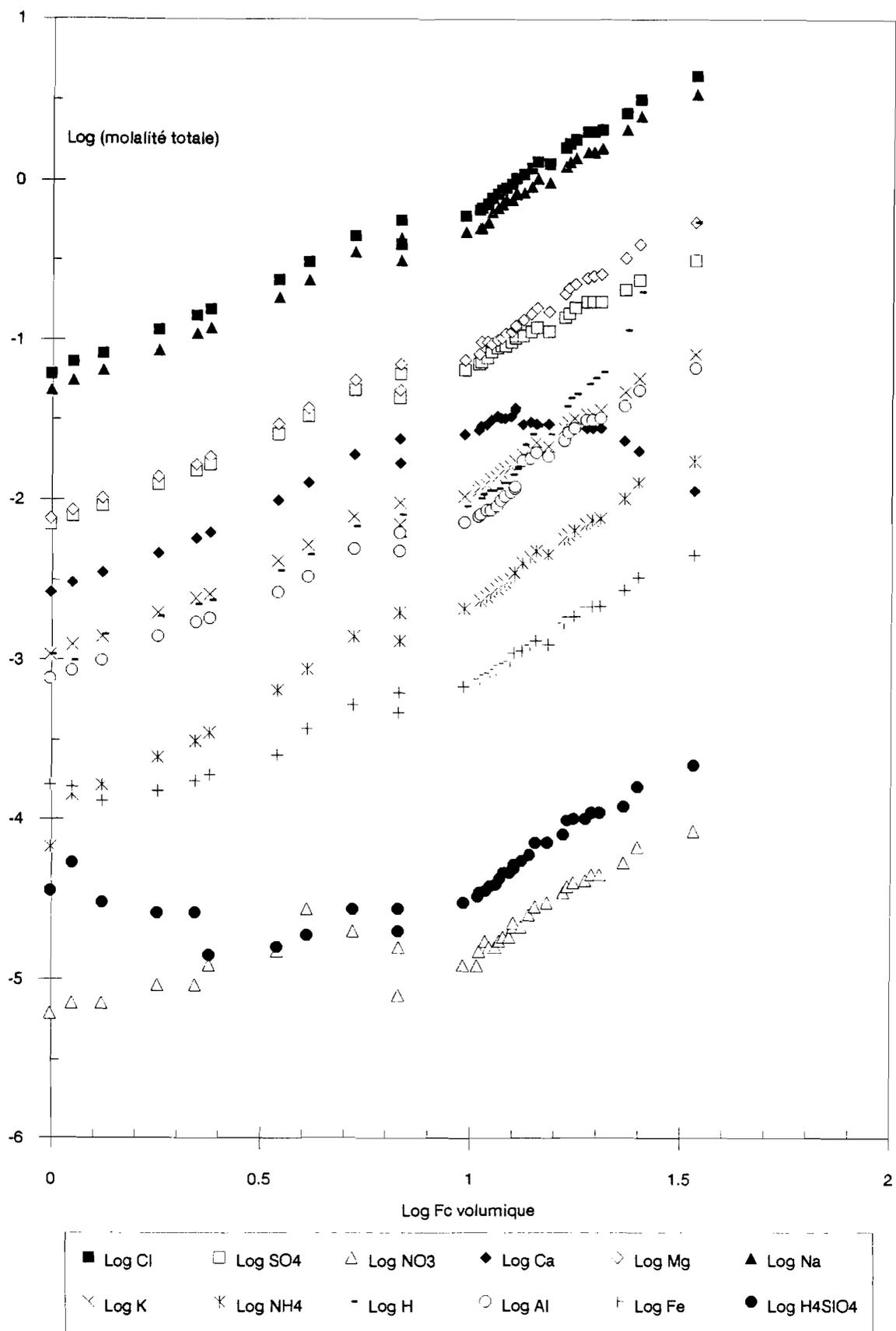


Figure 12: Evolution de la composition chimique en fonction du facteur de concentration volumique au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

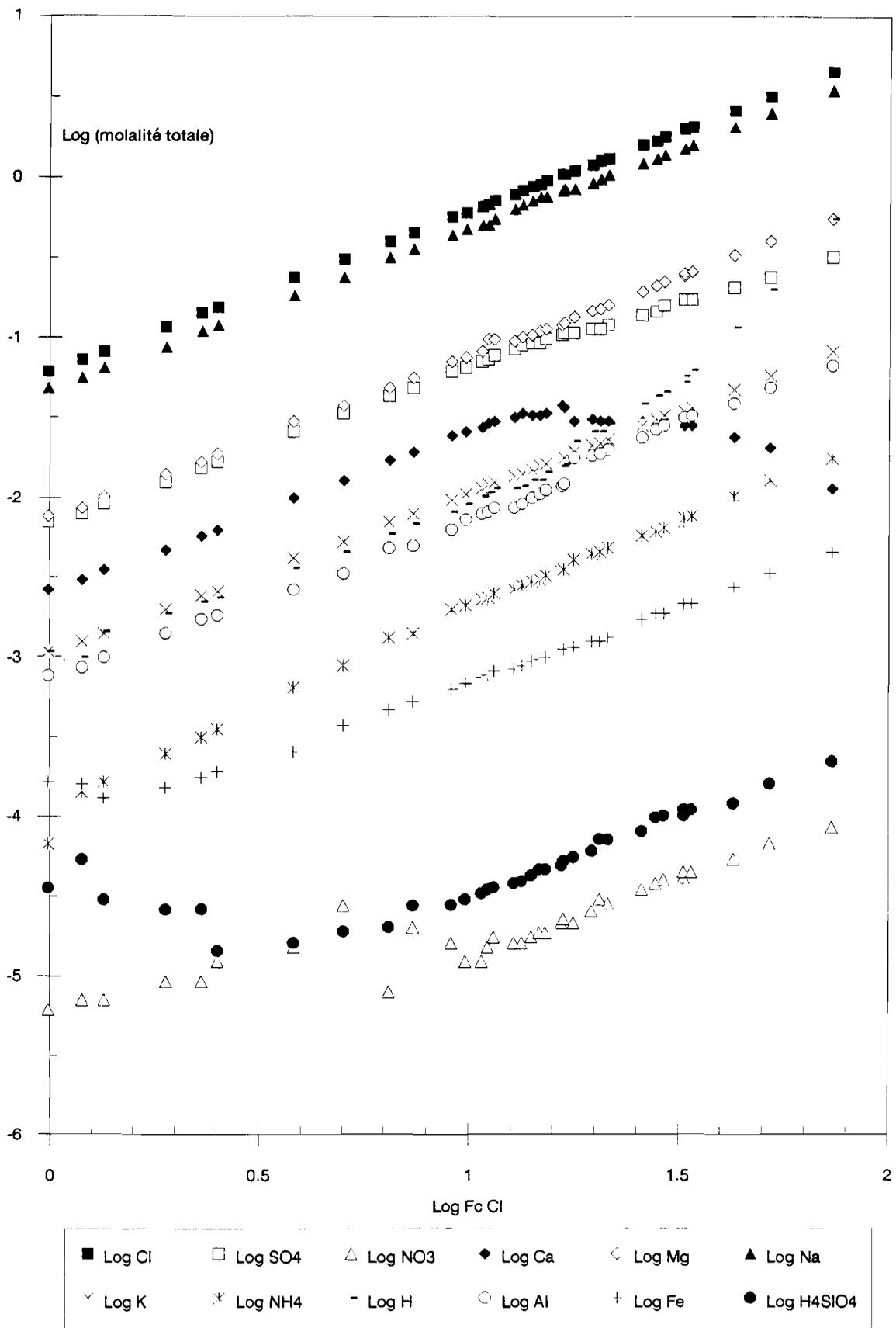


Figure 13: Evolution de la composition chimique en fonction du facteur de concentration chlore au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

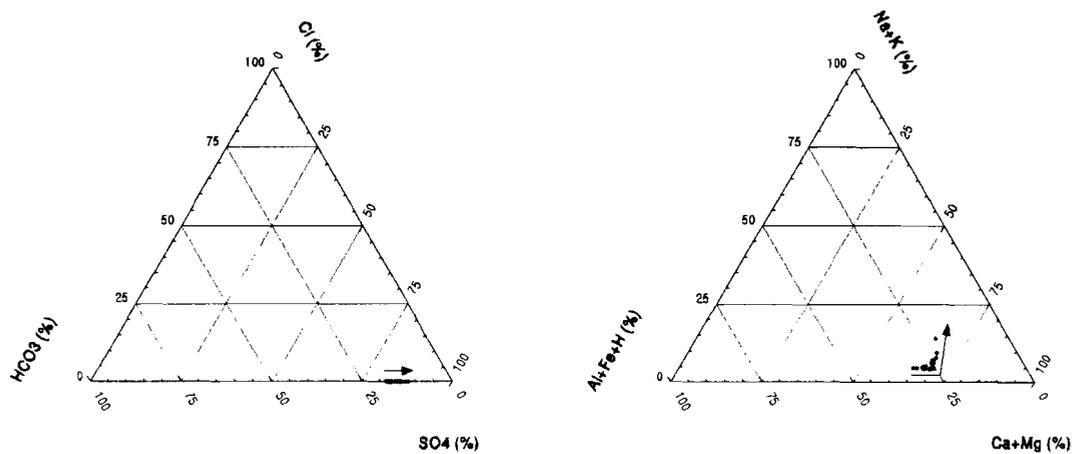


Figure 14: Evolution des compositions anionique et cationique au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

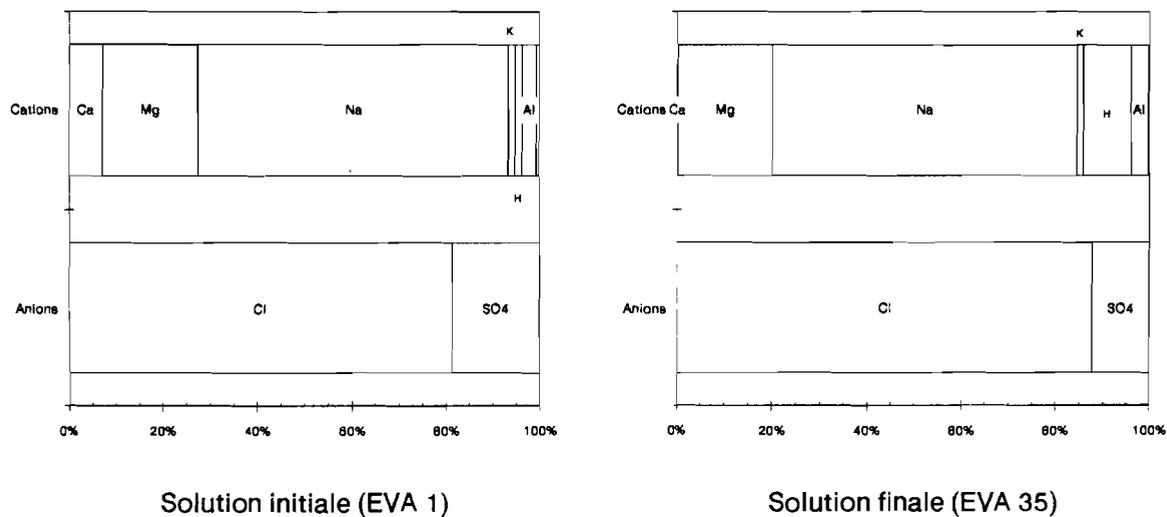


Figure 15: Faciès chimiques des solutions initiale et finale au cours de l'expérimentation EVACIDE 1991-1992

5. CONCLUSION

Les données acquises au cours de l'expérimentation EVACIDE seront comparées à celles obtenues dans le milieu naturel où la présence d'une phase solide influe sur l'évolution de la solution, notamment avec la conservation du pH.

Elles seront également utilisées pour calculer la distribution des espèces aqueuses (ions libres et paires d'ions). Les modèles numériques utilisés au laboratoire de Géologie de Strasbourg seront mis en oeuvre pour établir les équilibres entre les minéraux. Les faibles valeurs de pH atteintes seront une limite sérieuse à leur emploi.

Quelques critiques de l'échantillonnage peuvent être faites pour améliorer le jeu de données:

- les variations observées dans la courbe de concentration (figure 1) se sont répercutés sur l'échantillonnage où on note une diminution de la CE. Les échantillons EVA 11 et EVA 26 seront donc éliminés lors de traitements ultérieurs des données.

- on constate également une certaine redondance dans l'information lorsque l'intervalle de temps entre deux prises d'échantillon est court. On pourra éventuellement considérer un seul échantillon pour les couples EVA 5 et 6, EVA 13 et 14, EVA 21 et 22 et EVA 30 et 31.

Remarque:

Les échantillons EVA36 et EVA37 correspondent à la saumure finale. La mesure directe du pH a donné des valeurs proches de zéro, voire négatives (-0.13 pour EVA37). Cependant, une telle mesure dans des saumures très acides n'a pas de signification. Il est préférable de doser l'acidité totale qui se compose d'une acidité protonique et d'une acidité cationique. Le dosage de l'acidité des solutions permet le calcul de la molalité des ions H^+ connaissant la molalité des ions Al^{3+} et Fe^{3+} .

Par exemple, pour EVA37, on a:

$$\text{Acidité totale} = 736.3 \text{ mmol/l}$$

$$\text{Acidité } H^+ = \text{Ac. totale} - 3(Al^{3+}) - 3(Fe^{3+}) = 317.2 \text{ mmol/l}$$

ce qui correspond à un pH de 0.5

BIBLIOGRAPHIE

ALBERGEL J., BRUNET D., DUBEE G., MONTOROI J.P., ZANTE P., 1991. Gestion d'un barrage anti-sel en basse Casamance (Sénégal). In A. KERGREIS et J. CLAUDE (réd.), "Utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride", Ed. AUPELF-UREF, John Libbey Eurotext, Paris, 275-285.

CARN M., 1985. Etude expérimentale de l'évolution chimique des eaux du lac de Guiers (Sénégal) concentrées par évaporation. DEA de Géologie. Appliquée, Univ. Dakar, Multigr., 87 p.

LE BRUSQ J.Y., LOYER J.Y., MOUGENOT B., CARN M., 1987. Nouvelles paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer et de magnésium, et de leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal. *Science du Sol*, 25(3), 173-184.

LINDSAY W. L., 1979. *Chemical equilibria in soils*. John Wiley and sons, New-York- Chichester-Brisbane-Toronto, 448 p.

MICHARD G., 1989. *Equilibres chimiques dans les eaux naturelles*. Coll. Sci. et Tech., Ed. Publisud, 357 p.

MONTOROI J.P., 1990. Les sols et l'agriculture dans le domaine estuarien de basse Casamance. Séminaire "Conservation et utilisation durable des ressources naturelles du bassin hydrographique de la Casamance", 22-26 Octobre 1990, Ziguinchor (Sénégal), 21 p.

MONTOROI J.P., ALBERGEL J., DOBOS A., FALL M., SALL S., BERNARD A., BRUNET D., DUBEE G., ZANTE P., 1992. A suitable water management for the rehabilitation of rice culture in the acid sulphate soils of lower Casamance (Senegal): a successful two years experiment. In D. DENT and M.E.F. van MENSVOORT (Eds): "Selected papers of the Ho Chi Minh Ville symposium on acid sulphate soils, Viêt-Nam, March 1992", ILRI Wageningen, The Netherlands, (sous presse).

NORDSTROM D.K., 1977. Thermochemical redox equilibria of ZoBell's solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 41 (12), 1835-1841.

RICHARDS L.A., 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Handbook 60, U.S. Salinity Laboratory Staff, Washington, 159 p.

ANNEXES

- * Composition chimique des échantillons d'eau
- * Diagramme de RX sur le dépôt salin résiduel

Echantillon	Date	n jours	pH	CE		D g/cm3	Alc. mmolc/l	Eh		C mmolc/l	I mol/l	CD g/l	V l	M g
				20°C dS/m	25°C			mV	Eh7					
EVA1	2/5/91	0	2.97	7.15	7.95	1.001	-1.072	791	552	73.9	0.094	4.28	83.820	358.9
EVA2	1/6/91	30	3.01	7.87	8.75	1.002	-0.977	772	539	85.5	0.108	4.99	74.863	373.2
EVA3	1/7/91	60	2.85	8.98	9.99	1.003	-1.413	728	485	98.4	0.124	5.70	63.504	361.8
EVA4	5/8/91	95	2.73	12.2	13.6	1.004	-1.862	758	500	135.8	0.171	7.90	46.540	367.7
EVA5	17/8/91	107	2.66	14.4	16.0	1.006	-2.188	762	505	165.9	0.209	9.64	37.776	364.0
EVA6	27/8/91	117	2.63	15.7	17.5	1.007	-2.344	761	503	181.3	0.229	10.52	34.519	363.3
EVA7	14/10/91	165	2.45	22.9	25.5	1.011	-3.548	710	443	278.6	0.351	16.15	23.856	385.2
EVA8	28/10/91	179	2.34	29.1	32.4	1.015	-4.571	703	427	363.7	0.458	21.09	20.159	425.1
EVA9	18/11/91	200	2.17	41.5	46.1	1.023	-6.761	699	412	537.8	0.677	31.17	15.472	482.2
EVA10	16/12/91	228	2.09	48.6	54.0	1.027	-8.128	695	403	665.9	0.840	38.61	11.996	463.2
EVA11	17/12/91	229	2.23	37.6	41.8	1.020	-5.888	697	410	477.1	0.601	27.82	11.800	325.9
EVA12	3/1/92	246	2.04	53.4	59.4	1.030	-9.120	692	397	715.6	0.902	41.49	8.251	342.3
EVA13	19/1/92	262	1.99	55.6	61.8	1.032	-10.233	705	394	781.5	0.986	45.24	7.579	342.9
EVA14	26/1/92	269	1.97	59.2	65.8	1.034	-10.715	687	383	806.1	1.029	46.37	7.446	345.3
EVA15	7/2/92	281	1.95	61.6	68.5	1.035	-11.220	683	376	844.6	1.074	48.61	7.151	347.6
EVA16	24/2/92	298	1.94	64.9	72.2	1.037	-11.482	675	370	939.7	1.176	54.30	6.923	376.0
EVA17	9/3/92	312	1.93	67.1	74.6	1.039	-11.749	665	359	986.9	1.235	57.06	6.689	381.7
EVA18	18/3/92	321	1.90	70.5	78.4	1.041	-12.589	670	363	1036.2	1.292	59.94	6.439	386.0
EVA19	27/3/92	330	1.89	72.7	80.8	1.042	-12.882	667	363	1076.8	1.341	62.22	6.246	388.6
EVA20	5/4/92	339	1.85	75.3	83.7	1.044	-14.125	662	362	1110.8	1.384	64.28	6.004	386.0
EVA21	19/4/92	353	1.81	79.4	88.3	1.047	-15.488	617	315	1200.4	1.496	69.56	5.832	405.7
EVA22	24/4/92	358	1.80	80.8	89.8	1.048	-15.849	656	351	1223.8	1.525	70.78	5.718	404.7
EVA23	10/5/92	374	1.66	85.8	95.4	1.051	-21.878	639	330	1278.1	1.598	73.52	5.457	401.2
EVA24	23/5/92	387	1.60	90.3	100	1.054	-25.119	633	330	1396.6	1.739	80.31	5.146	413.3
EVA25	3/6/92	398	1.55	96.4	107	1.058	-28.184	628	317	1516.1	1.884	87.06	4.911	427.5
EVA26	13/6/92	408	1.59	93.1	104	1.056	-25.704	619	311	1452.5	1.803	83.41	4.570	381.2
EVA27	22/6/92	417	1.42	110	122	1.067	-38.019	613	300	1820.1	2.254	104.26	4.177	435.5
EVA28	30/6/92	425	1.37	117	130	1.071	-42.658	608	265	1946.1	2.410	111.50	3.971	442.8
EVA29	9/7/92	434	1.34	121	135	1.074	-45.709	605	275	2059.1	2.555	117.94	3.796	447.7
EVA30	23/7/92	448	1.28	127	141	1.078	-52.481	598	261	2256.4	2.795	129.26	-	-
EVA31	31/7/92	456	1.24	127	141	1.078	-57.544	599	254	2288.8	2.835	130.70	-	-
EVA32	8/8/92	464	1.20	134	149	1.082	-63.096	598	246	2377.7	2.939	135.63	-	-
EVA33	31/8/92	487	0.94	150	167	1.093	-114.815	602	215	3003.2	3.676	169.79	-	-
EVA34	11/9/92	498	0.71	151	168	1.094	-194.984	607	224	3668.8	4.467	205.67	-	-
EVA35	19/10/92	536	0.26	160	178	1.100	-549.541	-	-	5249.1	6.318	286.75	-	-
EVA36	1/12/92	579	0.04	164	182	1.102	-	-	-	6747.8	8.583	362.77	-	-
EVA37*	1/12/92	579	0.00	158	175	1.098	-	-	-	6911.9	9.557	368.24	-	-

CE conductivité électrique: CE 25°C = CE 20°C x 1.112

D masse volumique = 0.997 EXP(0.000551 CE)

Alc. alcalinité mesurée

Eh potentiel redox au pH de la solution

Eh potentiel redox à pH=7

C demi-concentration ionique totale

CD charge minérale dissoute totale

I force ionique

V volume de la solution

M masse de matière dissoute = V x CD

* Echantillon EVA36 après évaporation

Echantillon	Ca	Mg	Na	K	NH4	H	Al	Fe	Cl	SO4	NO3	Sc	Sa	Sc-Sa.	E
	mmolc/l											mmolc/l		%	
EVA1	5.24	14.94	48.5	1.08	0.07	1.07	2.26	0.49	60.3	13.84	0.01	73.6	74.1	-0.5	-0.7
EVA2	6.00	17.10	54.7	1.22	0.14	0.98	2.52	0.48	72.2	15.66	0.01	83.1	87.9	-4.7	-5.5
EVA3	7.04	20.40	63.6	1.40	0.16	1.41	2.97	0.39	81.4	18.00	0.01	97.4	99.4	-2.0	-2.1
EVA4	9.40	27.60	86.4	1.97	0.24	1.86	4.08	0.45	115.0	24.60	0.01	132.0	139.6	-7.6	-5.6
EVA5	11.50	33.40	107.5	2.41	0.31	2.19	5.01	0.53	139.0	30.00	0.01	162.8	169.0	-6.2	-3.7
EVA6	12.44	37.40	116.5	2.53	0.35	2.34	5.37	0.57	152.0	33.00	0.01	177.5	185.0	-7.5	-4.1
EVA7	19.44	58.40	180.0	4.18	0.63	3.55	7.80	0.75	232.0	50.40	0.02	274.8	282.4	-7.7	-2.8
EVA8	25.40	75.00	237.0	5.18	0.87	4.57	9.84	1.10	303.0	65.40	0.03	359.0	368.4	-9.5	-2.6
EVA9	38.20	111.00	350.0	7.75	1.39	6.76	14.88	1.56	447.0	97.00	0.02	531.5	544.0	-12.5	-2.3
EVA10	47.40	138.20	432.0	9.55	1.97	8.13	18.48	1.87	553.0	121.20	0.02	657.6	674.2	-16.6	-2.5
EVA11	33.80	96.80	314.0	7.00	1.30	5.89	14.28	1.37	394.0	85.80	0.01	474.4	479.8	-5.4	-1.1
EVA12	50.60	146.40	464.0	10.50	2.06	9.12	21.36	2.01	596.0	129.20	0.01	706.1	725.2	-19.2	-2.7
EVA13	54.60	163.40	504.0	11.40	2.24	10.23	23.40	2.20	652.0	139.60	0.01	771.5	791.6	-20.1	-2.6
EVA14	56.60	191.40	500.0	11.90	2.32	10.72	24.12	2.27	668.0	144.80	0.02	799.3	812.8	-13.5	-1.7
EVA15	59.60	192.40	536.0	12.50	2.44	11.22	25.35	2.42	696.0	151.20	0.02	841.9	847.2	-5.3	-0.6
EVA16	62.80	189.00	635.0	13.40	2.62	11.48	25.83	2.50	772.0	164.80	0.02	942.6	936.8	5.8	0.6
EVA17	65.60	197.00	669.0	13.80	2.75	11.75	27.21	2.64	810.0	174.00	0.02	989.8	984.0	5.7	0.6
EVA18	64.60	204.00	704.0	14.60	2.92	12.59	29.61	2.77	858.0	179.20	0.02	1035.1	1037.2	-2.1	-0.2
EVA19	63.20	214.00	736.0	15.50	3.00	12.88	30.90	2.88	892.0	183.20	0.02	1078.4	1075.2	3.1	0.3
EVA20	65.20	220.00	749.0	16.10	3.20	14.13	33.00	2.94	928.0	190.00	0.02	1103.6	1118.0	-14.4	-1.3
EVA21	73.00	236.00	803.0	17.30	3.41	15.49	35.40	3.18	1008.0	206.00	0.02	1186.8	1214.0	-27.2	-2.3
EVA22	71.60	242.00	827.0	17.70	3.49	15.85	36.60	3.33	1022.0	208.00	0.02	1217.6	1230.0	-12.5	-1.0
EVA23	59.00	262.00	845.0	19.10	3.97	21.88	51.90	3.36	1082.0	208.00	0.02	1266.2	1290.0	-23.8	-1.9
EVA24	60.20	288.00	925.0	21.00	4.35	25.12	53.70	3.72	1190.0	222.00	0.03	1381.1	1412.0	-30.9	-2.2
EVA25	59.00	316.00	1008.0	22.80	4.77	28.18	58.50	3.93	1295.0	236.00	0.03	1501.2	1531.0	-29.8	-2.0
EVA26	58.40	300.00	968.0	21.60	4.49	25.70	56.10	3.72	1245.0	222.00	0.03	1438.0	1467.0	-29.0	-2.0
EVA27	58.40	384.00	1215.0	27.60	5.61	38.02	70.50	5.04	1562.0	274.00	0.03	1804.2	1836.0	-31.9	-1.8
EVA28	54.40	418.00	1277.0	30.30	6.10	42.66	78.30	5.46	1692.0	288.00	0.04	1912.2	1980.0	-67.8	-3.5
EVA29	55.20	444.00	1360.0	31.80	6.46	45.71	83.40	5.58	1772.0	314.00	0.04	2032.1	2086.0	-53.9	-2.6
EVA30	56.00	486.00	1480.0	33.50	7.02	52.48	92.40	6.45	1961.0	338.00	0.04	2213.9	2299.0	-85.2	-3.8
EVA31	55.20	500.00	1507.0	34.40	7.30	57.54	93.60	6.45	1978.0	338.00	0.04	2261.5	2316.0	-54.6	-2.4
EVA32	55.40	518.00	1573.0	35.90	7.67	63.10	94.80	6.45	2055.0	346.00	0.05	2354.3	2401.0	-46.7	-2.0
EVA33	46.60	650.00	2027.0	46.30	10.10	114.82	114.60	8.01	2585.0	404.00	0.05	3017.4	2989.1	28.4	0.9
EVA34	40.40	784.00	2466.0	56.90	12.60	194.98	143.70	9.93	3165.0	464.00	0.07	3708.5	3629.1	79.4	2.2
EVA35	22.40	1080.00	3482.0	80.10	17.30	549.54	195.30	13.53	4440.0	618.00	0.09	5440.2	5058.1	382.1	7.3
EVA36	11.40	1820.00	3630.0	144.00	32.50	912.01	360.00	23.61	5490.0	1072.00	-	6933.5	6562.0	371.5	5.5
EVA37*	7.80	2800.00	2570.0	202.00	50.90	1000.0	369.00	50.10	5130.0	1644.00	-	7049.8	6774.0	275.8	4.0

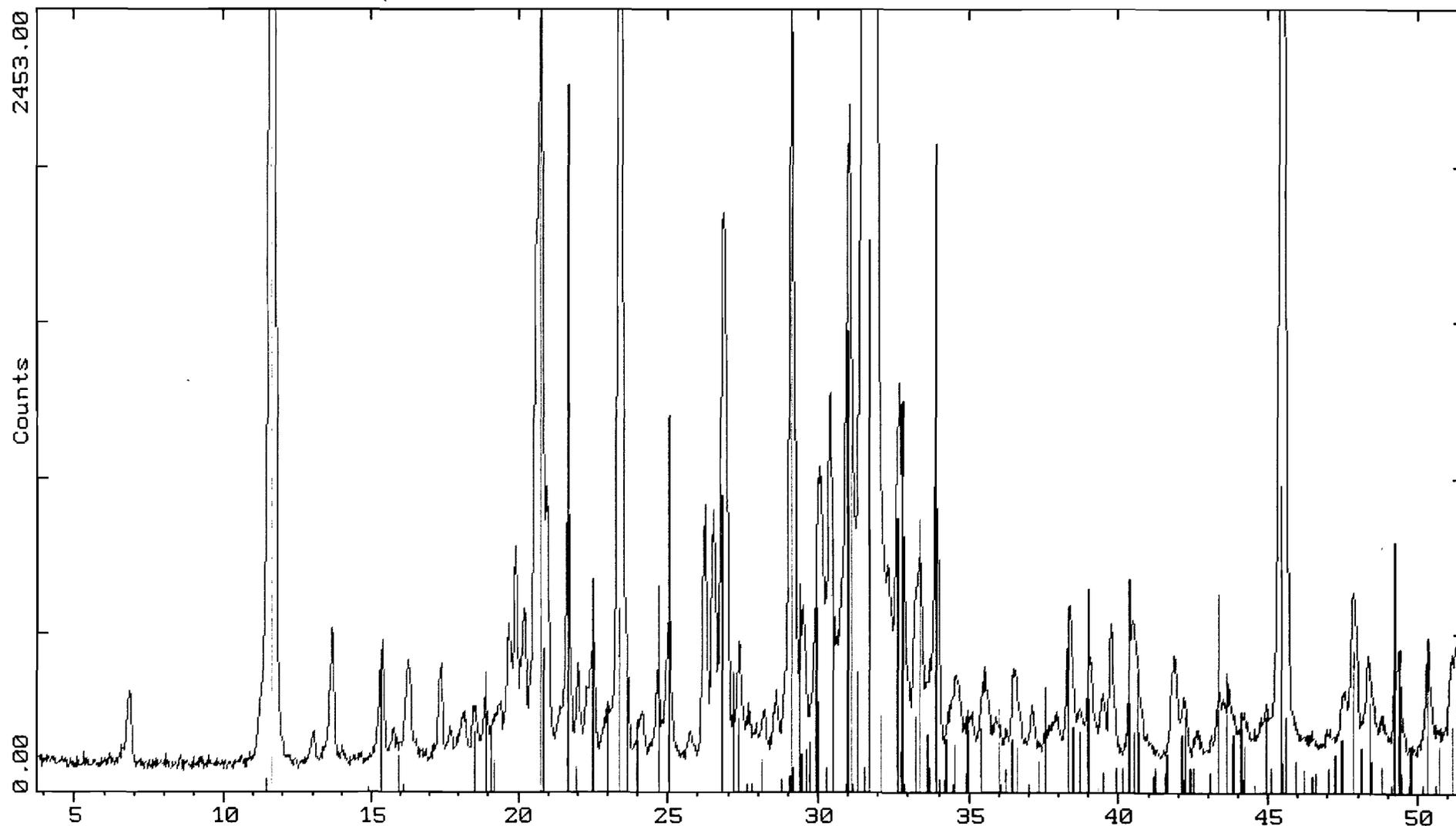
Sc somme des cations

Sa Somme des anions

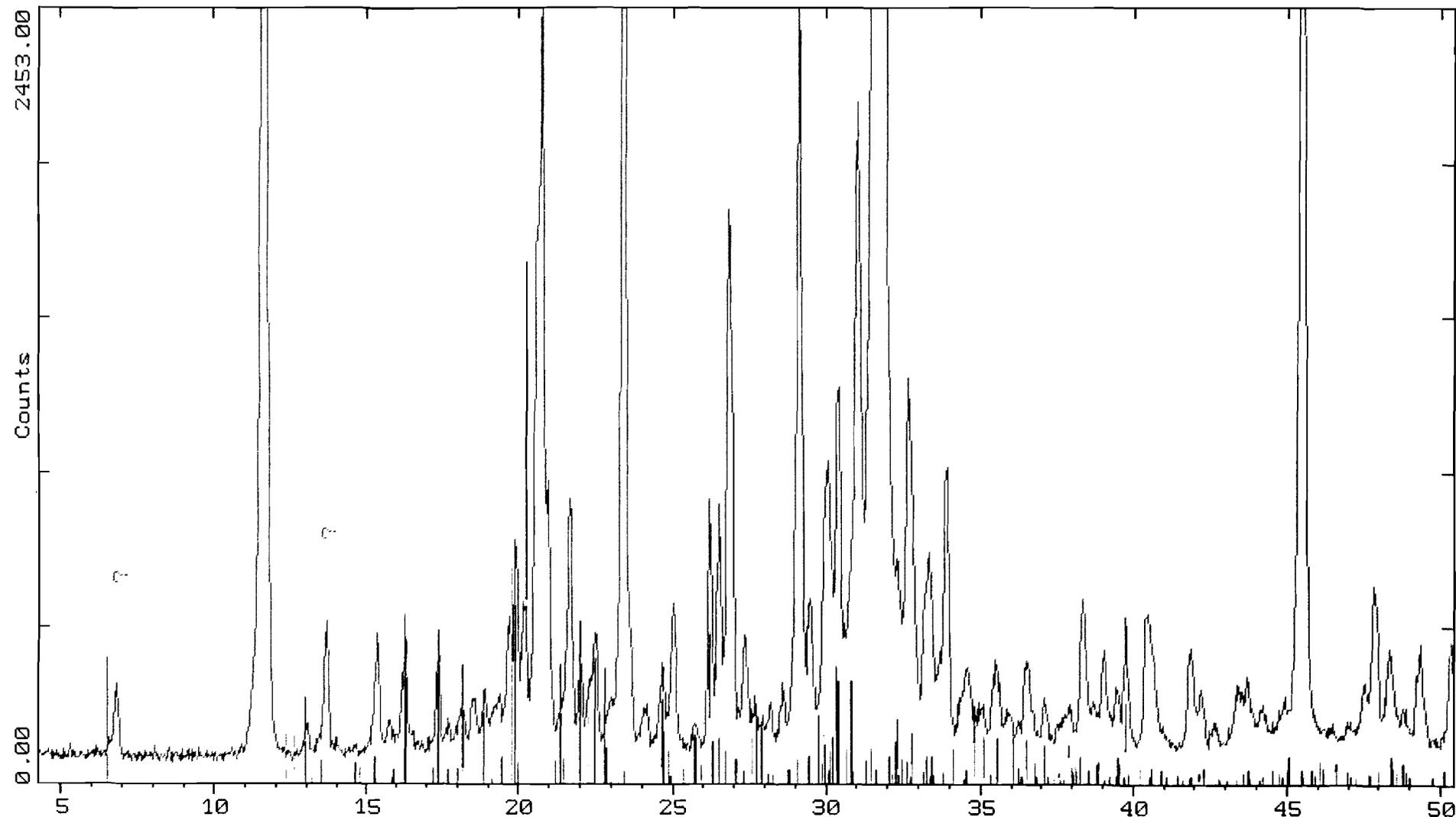
E erreur relative = 200 (Sc-Sa)/(Sc+Sa)

Echantillon	Ca	Mg	Na	K	NH4	H	Al	Fe	Cl	SO4	NO3	H4SiO4
mmol/l												
EVA1	2.62	7.47	48.5	1.08	0.067	1.0715	0.752	0.163	60.3	6.92	0.006	0.035
EVA2	3.00	8.55	54.7	1.22	0.142	0.9772	0.841	0.159	72.2	7.83	0.007	0.053
EVA3	3.52	10.2	63.6	1.40	0.162	1.4125	0.990	0.131	81.4	9.00	0.007	0.030
EVA4	4.70	13.8	86.4	1.97	0.242	1.8621	1.360	0.149	115.0	12.30	0.009	0.026
EVA5	5.75	16.7	107.5	2.41	0.307	2.1878	1.670	0.175	139.0	15.00	0.009	0.026
EVA6	6.22	18.7	116.5	2.53	0.350	2.3442	1.790	0.190	152.0	16.50	0.012	0.014
EVA7	9.72	29.2	180.0	4.18	0.630	3.5481	2.600	0.251	232.0	25.20	0.015	0.016
EVA8	12.7	37.5	237.0	5.18	0.865	4.5709	3.280	0.365	303.0	32.70	0.027	0.019
EVA9	19.1	55.5	350.0	7.75	1.390	6.7608	4.960	0.521	447.0	48.50	0.020	0.027
EVA10	23.7	69.1	432.0	9.55	1.970	8.1283	6.160	0.623	553.0	60.60	0.016	0.027
EVA11	16.9	48.4	314.0	7.00	1.300	5.8884	4.760	0.457	394.0	42.90	0.008	0.020
EVA12	25.3	73.2	464.0	10.50	2.060	9.1201	7.120	0.671	596.0	64.60	0.012	0.030
EVA13	27.3	81.7	504.0	11.40	2.240	10.233	7.800	0.734	652.0	69.80	0.012	0.032
EVA14	28.3	95.7	500.0	11.90	2.320	10.715	8.040	0.756	668.0	72.40	0.015	0.034
EVA15	29.8	96.2	536.0	12.50	2.440	11.220	8.450	0.806	696.0	75.60	0.017	0.035
EVA16	31.4	94.5	635.0	13.40	2.620	11.482	8.610	0.833	772.0	82.40	0.016	0.038
EVA17	32.8	98.5	669.0	13.80	2.750	11.749	9.070	0.881	810.0	87.00	0.016	0.039
EVA18	32.3	102.0	704.0	14.60	2.920	12.589	9.870	0.924	858.0	89.60	0.017	0.042
EVA19	31.6	107.0	736.0	15.50	3.000	12.882	10.30	0.960	892.0	91.60	0.018	0.046
EVA20	32.6	110.0	749.0	16.10	3.200	14.125	11.00	0.981	928.0	95.00	0.018	0.046
EVA21	36.5	118.0	803.0	17.30	3.410	15.488	11.80	1.060	1008.0	103.00	0.021	0.048
EVA22	35.8	121.0	827.0	17.70	3.490	15.849	12.20	1.110	1022.0	104.00	0.022	0.051
EVA23	29.5	131.0	845.0	19.10	3.970	21.878	17.30	1.120	1082.0	104.00	0.021	0.055
EVA24	30.1	144.0	925.0	21.00	4.350	25.119	17.90	1.240	1190.0	111.00	0.025	0.060
EVA25	29.5	158.0	1008.0	22.80	4.770	28.184	19.50	1.310	1295.0	118.00	0.028	0.070
EVA26	29.2	150.0	968.0	21.60	4.490	25.704	18.70	1.240	1245.0	111.00	0.030	0.070
EVA27	29.2	192.0	1215.0	27.60	5.610	38.019	23.50	1.680	1562.0	137.00	0.034	0.080
EVA28	27.2	209.0	1277.0	30.30	6.100	42.658	26.10	1.820	1692.0	144.00	0.038	0.096
EVA29	27.6	222.0	1360.0	31.80	6.460	45.709	27.80	1.860	1772.0	157.00	0.040	0.100
EVA30	28.0	243.0	1480.0	33.50	7.020	52.481	30.80	2.150	1961.0	169.00	0.041	0.100
EVA31	27.6	250.0	1507.0	34.40	7.300	57.544	31.20	2.150	1978.0	169.00	0.044	0.110
EVA32	27.7	259.0	1573.0	35.90	7.670	63.096	31.60	2.150	2055.0	173.00	0.045	0.110
EVA33	23.3	325.0	2027.0	46.30	10.10	114.82	38.20	2.670	2585.0	202.00	0.053	0.120
EVA34	20.2	392.0	2466.0	56.90	12.60	194.98	47.90	3.310	3165.0	232.00	0.066	0.160
EVA35	11.2	540.0	3482.0	80.10	17.30	549.54	65.10	4.510	4440.0	309.00	0.085	0.220
EVA36	5.7	910.0	3630.0	144.00	32.50	912.01	120.00	7.870	5490.0	536.00	-	0.345
EVA37*	3.9	1400.0	2570.0	202.00	50.90	1000.0	123.00	16.70	5130.0	822.00	-	0.700

Echantillon	Ca	Mg	Na	K	NH4	H	Al	Fe	Cl	SO4	NO3	H4SiO4
	g/l											
EVA1	0.105	0.182	1.115	0.042	0.001	0.001	0.020	0.009	2.138	0.665	0.000	0.003
EVA2	0.120	0.208	1.258	0.048	0.003	0.001	0.023	0.009	2.560	0.752	0.000	0.005
EVA3	0.141	0.248	1.462	0.055	0.003	0.001	0.027	0.007	2.886	0.865	0.000	0.003
EVA4	0.188	0.335	1.986	0.077	0.004	0.002	0.037	0.008	4.077	1.182	0.001	0.002
EVA5	0.230	0.406	2.471	0.094	0.006	0.002	0.045	0.010	4.928	1.441	0.001	0.002
EVA6	0.249	0.455	2.678	0.099	0.006	0.002	0.048	0.011	5.389	1.585	0.001	0.001
EVA7	0.390	0.710	4.138	0.163	0.011	0.004	0.070	0.014	8.225	2.421	0.001	0.002
EVA8	0.509	0.911	5.449	0.203	0.016	0.005	0.088	0.020	10.742	3.141	0.002	0.002
EVA9	0.766	1.349	8.046	0.303	0.025	0.007	0.134	0.029	15.847	4.659	0.001	0.003
EVA10	0.950	1.679	9.932	0.373	0.036	0.008	0.166	0.035	19.606	5.821	0.001	0.003
EVA11	0.677	1.176	7.219	0.274	0.023	0.006	0.128	0.026	13.968	4.121	0.000	0.002
EVA12	1.014	1.779	10.667	0.411	0.037	0.009	0.192	0.037	21.130	6.205	0.001	0.003
EVA13	1.094	1.986	11.587	0.446	0.040	0.010	0.210	0.041	23.115	6.705	0.001	0.003
EVA14	1.134	2.326	11.495	0.465	0.042	0.011	0.217	0.042	23.683	6.955	0.001	0.003
EVA15	1.194	2.338	12.323	0.489	0.044	0.011	0.228	0.045	24.675	7.262	0.001	0.003
EVA16	1.259	2.297	14.599	0.524	0.047	0.012	0.232	0.047	27.370	7.915	0.001	0.004
EVA17	1.315	2.394	15.380	0.540	0.050	0.012	0.245	0.049	28.717	8.357	0.001	0.004
EVA18	1.295	2.479	16.185	0.571	0.053	0.013	0.266	0.052	30.419	8.607	0.001	0.004
EVA19	1.267	2.601	16.920	0.606	0.054	0.013	0.278	0.054	31.624	8.799	0.001	0.004
EVA20	1.307	2.674	17.219	0.629	0.058	0.014	0.297	0.055	32.900	9.125	0.001	0.004
EVA21	1.463	2.868	18.461	0.676	0.062	0.016	0.318	0.059	35.737	9.894	0.001	0.005
EVA22	1.435	2.941	19.013	0.692	0.063	0.016	0.329	0.062	36.233	9.990	0.001	0.005
EVA23	1.182	3.184	19.426	0.747	0.072	0.022	0.467	0.063	38.360	9.990	0.001	0.005
EVA24	1.206	3.500	21.266	0.821	0.078	0.025	0.483	0.069	42.189	10.662	0.002	0.006
EVA25	1.182	3.840	23.174	0.891	0.086	0.028	0.526	0.073	45.912	11.335	0.002	0.007
EVA26	1.170	3.646	22.254	0.845	0.081	0.026	0.505	0.069	44.139	10.662	0.002	0.007
EVA27	1.170	4.667	27.933	1.079	0.101	0.038	0.634	0.094	55.378	13.160	0.002	0.008
EVA28	1.090	5.080	29.358	1.185	0.110	0.043	0.704	0.102	59.986	13.832	0.002	0.009
EVA29	1.106	5.396	31.266	1.243	0.117	0.046	0.750	0.104	62.823	15.081	0.002	0.010
EVA30	1.122	5.906	34.025	1.310	0.127	0.053	0.831	0.120	69.523	16.234	0.003	0.010
EVA31	1.106	6.076	34.646	1.345	0.132	0.058	0.842	0.120	70.126	16.234	0.003	0.011
EVA32	1.110	6.295	36.163	1.404	0.138	0.064	0.853	0.120	72.856	16.618	0.003	0.011
EVA33	0.934	7.899	46.600	1.810	0.182	0.116	1.031	0.149	91.646	19.404	0.003	0.012
EVA34	0.810	9.528	56.693	2.225	0.227	0.197	1.292	0.185	112.209	22.285	0.004	0.015
EVA35	0.449	13.125	80.050	3.132	0.312	0.554	1.756	0.252	157.411	29.682	0.005	0.021
EVA36	0.228	22.118	83.453	5.630	0.586	0.919	3.238	0.440	194.637	51.487	-	0.033
EVA37*	0.156	34.027	59.084	7.898	0.918	1.008	3.319	0.933	181.874	78.959	-	0.067



A:\EVACIDEZ.RAW EVACIDEZ (CT: 2.0s, SS:0.030dg, WL: 1.5409Ao)
5-0628 * NaCl Halite syn (WL: 1.5409Ao)
33-0311 * Na2SO4 10H2O Gypsum (WL: 1.5409Ao)
24-0869 * KMgCl3.6H2O Carnallite (WL: 1.5409Ao)
25-0515 * MgCl2.6H2O Bischofite syn (WL: 1.5409Ao)



A:\EVACIDEZ.RAW EVACIDEZ (CT: 2.0s, SS:0.030dg, WL: 1.5409Ao)

24-1010 (1) (MgSO4.4H2O) (JCPDS 04-1010)

24-0720 * MgSO4.4H2O Starkeyite syn (WL: 1.5409Ao)

24-0719 * MgSO4.6H2O Hexahydrate syn (WL: 1.5409Ao)