

MINISTERE DE L'AGRICULTURE

DIRECTION DES RESSOURCES EN EAU ET EN SOL

DIVISION DES SOLS

ETUDE METHODOLOGIQUE DES TRANSFERTS D'EAU ET DES SELS DANS UN MONOLITHE DE SOL ARGILEUX

3^{ÈME} PARTIE : SUIVI DE LA SALURE PAR CAPTEURS
ET CARACTERISATION CHIMIQUE DES SOLUTES

Par : V. VALLES V.S.N.A., Pédologue à l'O.R.S.T.O.M.
A. M. VALLES, Allocataire D.G.R.S.T.
J. VIEILLEFON, Pédologue à l'O.R.S.T.O.M.

E-S 203

République tunisienne
Ministère de l'Agriculture
DIRECTION DES RESSOURCES
EN EAU ET EN SOL
Division des Sols

ETUDE METHODOLOGIQUE DES TRANSFERTS D'EAU
ET DES SELS DANS UN MONOLITHE DE SOL ARGILEUX

3ÈME PARTIE : SUIVI DE LA SALURE PAR CAPTEURS ET
CARACTÉRISATION CHIMIQUE DES SOLUTÉS

Par V. VALLES V.S.N.A. Pédologue à l'ORSTOM
A.M. VALLES Allocataire D.G.R.S.T.
J. VIEILLEFON Pédologue à l'ORSTOM

E S 203

SUIVI DE LA DYNAMIQUE DE LA SALURE PAR CAPTEURS ET
CARACTERISATION CHIMIQUE DES SOLUTES

SOMMAIRE

1ère Partie : Utilisation des capteurs pour l'étude du bilan
des sels

I	Equipement du monolithe	2
II	Analyse des expériences d'arrosage	4
	A Essai de mai 1980	6
	B Essai en régime saturé	8
	1. Salinity-sensors	8
	2. Quadripôles	13
	C Arrosage à l'eau salée	15
	1. Conductivité des prélèvements	15
	2. Evolution de la composition ionique des solutions	17
	3. Evolution comparée de CE _{SS} et CEG	19
	D Essai de lessivage	19
III	Utilisation de la conductivité électrique globale pour l'estimation du bilan des sels	22
	A Interprétation de la conductivité électrique globale	22
	B Extension à l'estimation de la teneur en sels du sol	23
	C Application à l'étude de l'évaluation du bilan des sels du monolithe	24
	1. Elaboration des données	
	2. Influence limitée de la teneur en eau	
	3. Procédure de calcul à l'aide d'un micro-ordinateur	25
	4. Résultats obtenus	27
	Conclusion	33

2ème Partie : Caractérisation chimique des solutés

Chapitre I	Dispositif expérimental et méthodes	34
Chapitre II	Résultats expérimentaux	37
	I Essai du 20.10.81	37
	II Essai du 20.1.82	37
	III Essai du 29.3.82	41
Chapitre III	Méthode de calcul géochimique	
	I Rappel sur les notions d'activité, molalité, saturation	47
	II Rappel sur les concepts d'alcalinité, alcalinité résiduelle, règle du T.	48
	III Relations pH, pCO ₂ , CO ₃ , HCO ₃	49
Chapitre IV	Caractérisation chimique des solutés	
	I Prévision de l'évolution chimique de l'eau d'irrigation	51
	II Etat de saturation du sol vis-à-vis de la calcite et de la magnésite	53
	III Evolution de pCO ₂ dans le sol soumis à l'irrigation	59
	IV Etat de saturation par rapport au gypse	61
Conclusions		68
Bibliographie		69

INTRODUCTION

Dans le triple but :

- de mettre au point la méthodologie des mesures tensio-neutroniques nécessaires à la caractérisation hydrodynamique du sol en régime saturé et non saturé,
- de tester divers capteurs de la salure pour l'étude de la dynamique des sols
- de mettre au point et de caler des modèles de simulation des transferts d'eau et de sels,

un monolithe de sol non perturbé, représentatif des sols des plaines alluviales de la Basse Vallée de la Medjerda, et provenant de la station de CHERFECH (dépendant du Centre de Recherche du Génie Rural ex CRUESI), a été installé au laboratoire de la D.R.E.S. de l'Ariana.

Un premier rapport (ES 198) a traité des essais préliminaires d'infiltration et de traçage ayant pour but de tenter d'apprécier les caractéristiques hydriques et la porosité.

Dans un second (ES 199), où sont rapportés des expériences qui ont fait appel à des équipements complémentaires, en tensiométrie notamment, un essai de modélisation des transferts d'eau est décrit.

Le présent rapport concerne l'étude de l'évolution de la salinité du sol et de sa solution à l'aide de divers capteurs, ainsi que la caractérisation chimique des solutions extraites vis à vis de leur évolution géochimique. Les deux parties en ont été redigées respectivement par J. VIEILLEFON , et A.M. et V. VALLES.

Suivi de la dynamique de la salure par différents capteurs et caractérisation chimique des solutés.

1ère partie Utilisation des capteurs pour l'étude du bilan des sels.

I - Equipement du monolithe

En sus de l'équipement destiné à l'étude des caractéristiques hydrodynamiques (cf 2ème partie, ES 199), c'est-à-dire un tube de sonde central pour l'humidimétrie neutronique et 9 tensiomètres implantés à 10, 20, 30, 40, 50, 65, 80, 110 et 150 cm, le monolithe a reçu 6 batteries de capteurs de la salure comportant bougie poreuse de prélèvement, salinity-sensors et sondes quadri-pôles implantés à 10, 30, 50, 80, 110, 150 cm, ainsi que des électrodes spécifiques des ions sodium et chlorure à 10, 50, et 110 cm (figure 1).

A) - Bougies poreuses de prélèvement

Identiques aux bougies équipant les tensiomètres, elles ont été implantées avec une légère pente vers la fiole réceptrice. L'utilisation d'un robinet à 3 voies permet de faire un vide partiel pour récupérer les solutions. (figure 2-a). L'étanchéité est assurée par un collage au "Rubson" à la traversée de l'enveloppe du monolithe.

Les prélèvements ont été faits au cours des essais d'arrosage avec différentes eaux d'irrigation, pendant les phases d'infiltration, de redistribution et d'évaporation, mais compte tenu de la succion mesurée aux tensiomètres correspondants, cela n'a été possible que lorsque cette succion restait inférieure au vide appliqué à la bougie, soit 0,4 bar. En réalité l'écoulement cesse souvent avant ce seuil, ce qui fait que les mesures n'ont été fructueuses qu'en phases d'infiltration et de redistribution, du moins pour les bougies les moins profondes.

Ce dispositif de prélèvement est complété d'un ajutage recueillant les eaux drainant à la base du monolithe.

B) - Salinity-sensors (figure 2-b)

Ces instruments, composés d'une cellule de conductivité en porcelaine poreuse de 6 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur et d'un thermistor, permettent de mesurer la conductivité de la solution imprégnant la cellule en la ramenant à la température conventionnelle de 25°C. Cette solution interne s'échange avec la solution du sol avec lequel elle est en contact. Ce dernier doit donc être parfait pour que les échanges soient complets et rapides. Si, par suite d'un dessèchement excessif, ce contact est mal ou non assuré, l'appareil de mesure décroche en général brutalement.

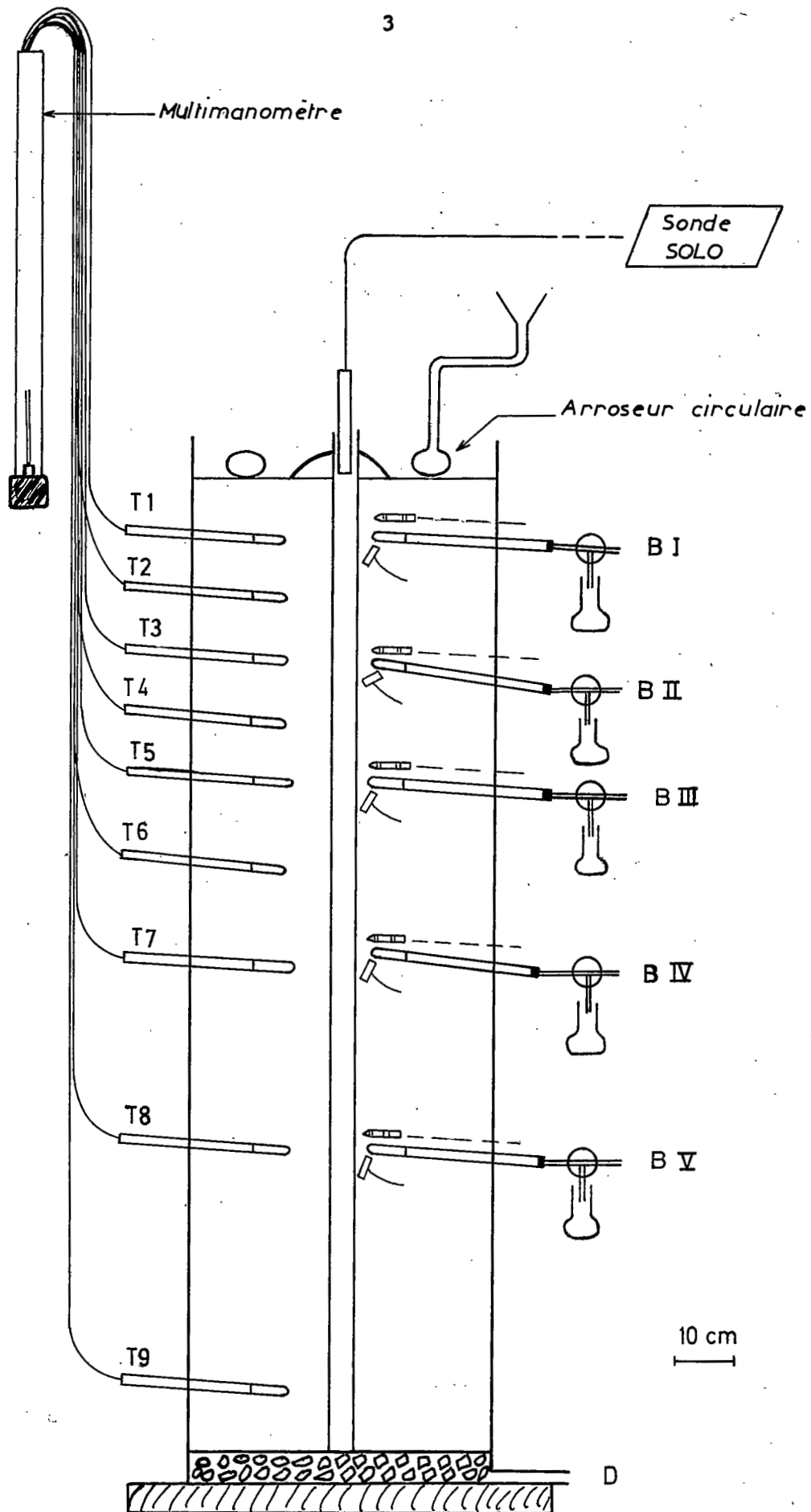


Fig. 1 - Schéma du monolithe

T₁ à T₉: Tensiomètres

B_I à B_V: Bougies de prélèvement

— Sonde
quadripôles

Salinity-s.

On admet généralement que l'échange nécessaire entre la cellule et la solution du sol provoque un certain retard de la variation du signal du salinity-sensor par rapport aux variations de conductivité de la solution du sol (WESSELING et OSTER, 1973).

C) - Sondes quadripôles (figure 2-c)

Il s'agit de capteurs cylindriques de 12 cm de long sur 1,2 cm de diamètre, comportant 4 anneaux en fil de nickel tenant lieu d'électrodes quadripôles, les deux extérieurs recevant un courant alternatif d'intensité I , les deux intérieures servant à la mesure de la différence de potentiel V créée par le champ électrique. La combinaison de I et V donne une valeur de "résistance" que le coefficient de cellule de chaque sonde étalonnée dans des solutions de conductivité connue permet de convertir en conductivité "apparente" du sol (RHOADES & al. 197). On appellera plutôt cette dernière conductivité globale, car elle intègre non seulement la conductivité de la solution du sol, mais également la teneur en eau du sol et la conductivité liée aux surfaces d'échange du complexe absorbant :

$$CEG = f (CE_{SS}, \theta, CE_S)$$

avec CE_{SS} : conductivité de la solution du sol (sans doute équivalente à celle que mesure le salinity-sensor)

CE_S : conductivité des surfaces d'échange

Les mesures sont faites simultanément avec celles des salinity-sensors afin de comparer les résultats.

L'étalonnage des 6 sondes du monolithe a donné les coefficients suivants :

- à 10 cm $K = 130,32$
- à 30 cm $K = 139,01$
- à 50 cm $K = 136,22$
- à 80 cm $K = 143,81$
- à 110cm $K = 125,25$
- à 150cm $K = 142,49$

On obtient d'autre part :

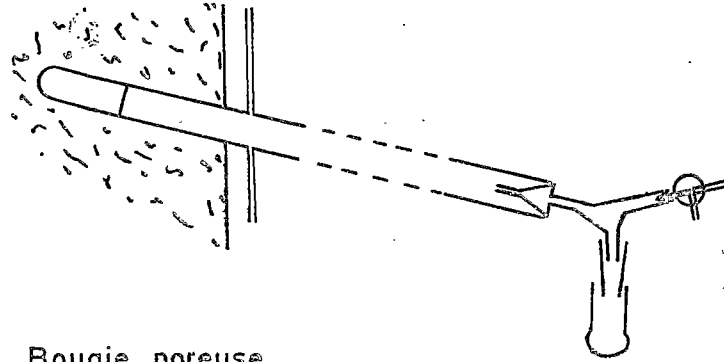
soit $CEG = \frac{K}{R_{ohm}}$ sans correction de température

soit $CEG_{25} = CEG \times f_t$, f_t étant le facteur correctif trouvé dans des tables.

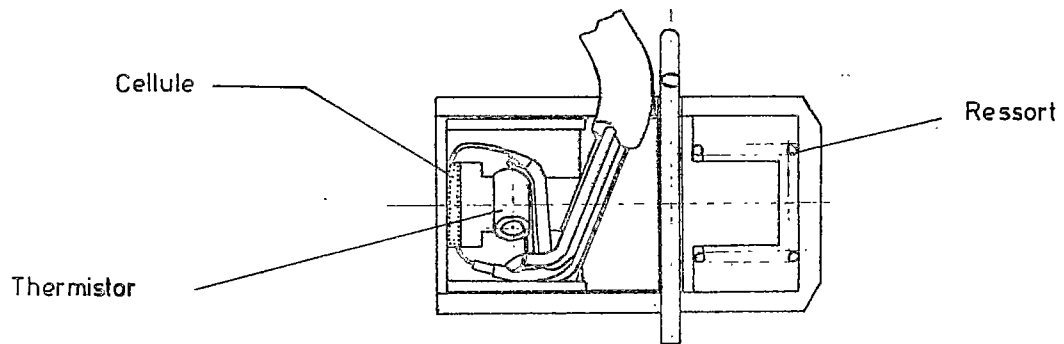
II - Analyse des expériences d'arrosage

Les mesures sur les différents capteurs ont été réalisées au cours de la plupart des essais d'infiltration effectués de 1980 à 1982 (voir 1ère et 2ème partie, ES 198 et ES 199),

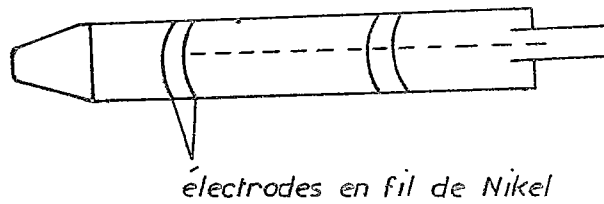
Fig.2 - Capteurs



a - Bougie poreuse



b - Salinity sensor



c - Sonde quadripolaire (d'après RHOADES et al 1976)

à l'exception de certains où les bougies poreuses ou les électrodes spécifiques n'ont pas été utilisées. A.M. et V.VALLÉS ont en effet estimé que la succion, pourtant limitée, appliquée aux bougies pouvait perturber les flux ce qui nuirait aux mesures concernant la caractérisation hydrodynamique, et que par ailleurs la nécessité d'utiliser des "ponts" au nitrate de potassium pour l'électrode de référence risquait d'influencer les variations de ce cation.

On dispose cependant de plusieurs séries de mesures où le drainage et les bougies situées à 10 et 110 cm ont fonctionné (y compris l'essai avec marquage au tritium en régime saturé), et d'une série malheureusement incomplète où toutes les bougies ont été utilisées, parmi lesquelles seules les bougies implantées à 10, 80 et 110 cm ont correctement fonctionné. Nous ne disposons donc pas de mesures fiables à 30 et 50 cm pour ce type de canteur.

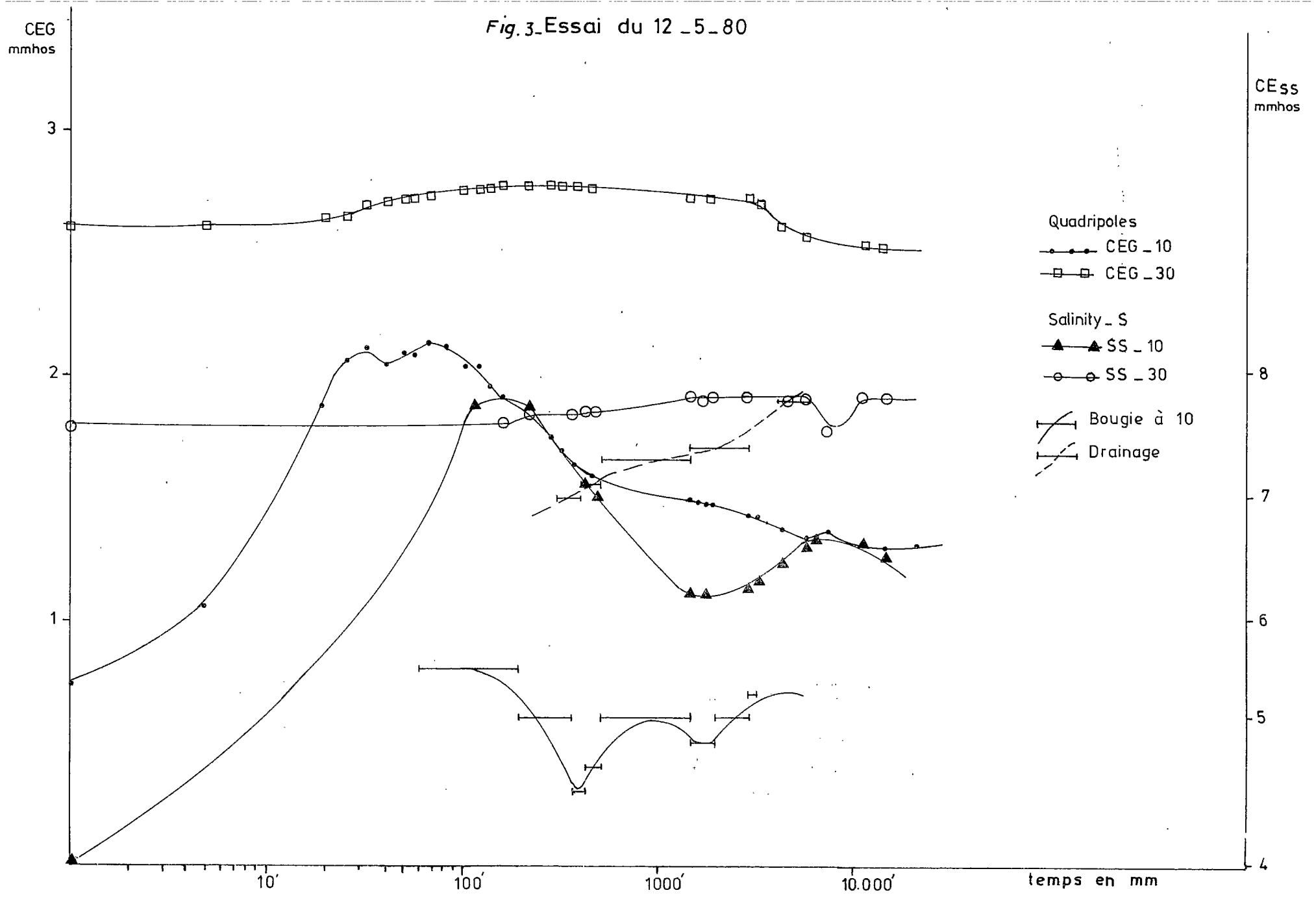
A) - Essai de mai 1980

Cet essai est un premier test de fonctionnement des capteurs. Le monolithe était desséché depuis plusieurs mois lorsque l'on a apporté tout d'abord 46 mm d'eau de conductivité 1,83 mmhos le 12-5, puis 122,5 mm du 28-5 au 4-6 avec des fractions de la même eau et la plus grande partie des eaux de drainage recueillies.

Au cours de la première phase on note, dès le début de l'arrosage, un effet très net à 10 cm :

- la conductivité électrique globale (CEG) passe en 5 minutes de 0,74 à 1,06 puis ne croît plus que lentement pour se stabiliser aux environs de 2,10 à partir de 30 mn. Elle redescend ensuite dès la fin de l'arrosage et rapidement à 1,6 puis jusqu'à 1,3 mais plus lentement. Cette diminution dure environ 7 jours (figure 3).
- le salinity-sensor réagit plus tardivement pour atteindre un maximum de 7,70 mmhos au bout de 2 heures, soit un décalage d'une heure et demi par rapport au quadrupôle. La diminution commence au bout de 250 mn contre 90 pour la CEG ; on observe ensuite un palier minimum (6,20 mmhos) de 1500 à 3000 mn, et ensuite une légère remontée,
- la conductivité des eaux recueillies dans la bougie subit des variations également assez nettes et de même forme que le salinity-sensor mais un peu plus tôt et avec des valeurs inférieures de 1,80 à 2,00 mmhos, en synchronisme avec la CEG.

Fig.3_Essai du 12_5_80



La valeur de la CEG étant fonction des variations de la conductivité de la solution du sol mais également de la teneur en eau, la diminution rapide de cette dernière entraîne une baisse lente de la CEG alors que la solution du sol se concentre avec l'évaporation commençante.

L'examen de la première partie de l'infiltration du 28-5 montre qu'à cette profondeur la CEG est très sensible aux variations de θ lors de chaque arrosage fractionné (figure 4).

Sur une plus longue période, du 28-5 au 16-10 (figure 5), pendant la phase d'évaporation, on observe une diminution rapide de CEG et CE_{SS} , durant plus longtemps pour la première avant leur amortissement, mais de comportement assez voisin.

On peut en déduire que l'eau apportée à la surface provoque le lessivage des sels accumulés dans la couche tout à fait superficielle, ce qui fait monter la CE_{SS} à 10 cm, avant que l'eau des apports suivants ne provoque une diminution ultérieure suivie d'une stabilisation, sans que l'on observe ensuite de remontée notable malgré le dessèchement progressif. Il semblerait donc que le dépôt des sels ne se fasse que très près de la surface du sol.

Pour la CEG, le premier apport d'eau provoque une augmentation aussitôt suivie d'une diminution dont la première phase serait liée au lessivage progressif des sels, à θ à peu près constant, la suivante résultant du départ de l'eau que l'on peut suivre par les variations du tensiomètre correspondant : forte diminution quand le tensiomètre passe de 10 à 800 mb, décroissance plus lente ensuite.

La diminution de la CEG à θ constant semblerait due au début de l'évaporation, à un phénomène de dessalement vers le haut, phénomène inverse de celui que l'on observe au début de l'arrosage.

On remarque en outre qu'à 30 cm l'effet de lessivage est très retardé et atténué. En effet la CE_{SS} reste voisine de 7,2-7,4 mmhos jusqu'au 10-7 soit 42 jours après l'arrosage mais diminue alors assez fortement pour rejoindre ensuite la valeur mesurée à 10 cm. Par contre la CEG montre rapidement avec les fortes humidités, atteignant son maximum en même temps qu'à 10 cm et diminuant ensuite rapidement quand le tensiomètre à 10 cm atteint son maximum. La connaissance des flux permet donc de proposer de premières explications aux variations de salure observées.

B) - Essai en régime saturé du 28-10-80 au 28-1-81, suivi d'évaporation jusqu'au 30-6-81.

1 - Salinity-sensors

On peut voir sur la figure 6 que la totalité des salinity-sensors ont réagi à cette importante opération de lessivage.

Fig. 4 - Comparaison comptages neutroniques /quadripôles

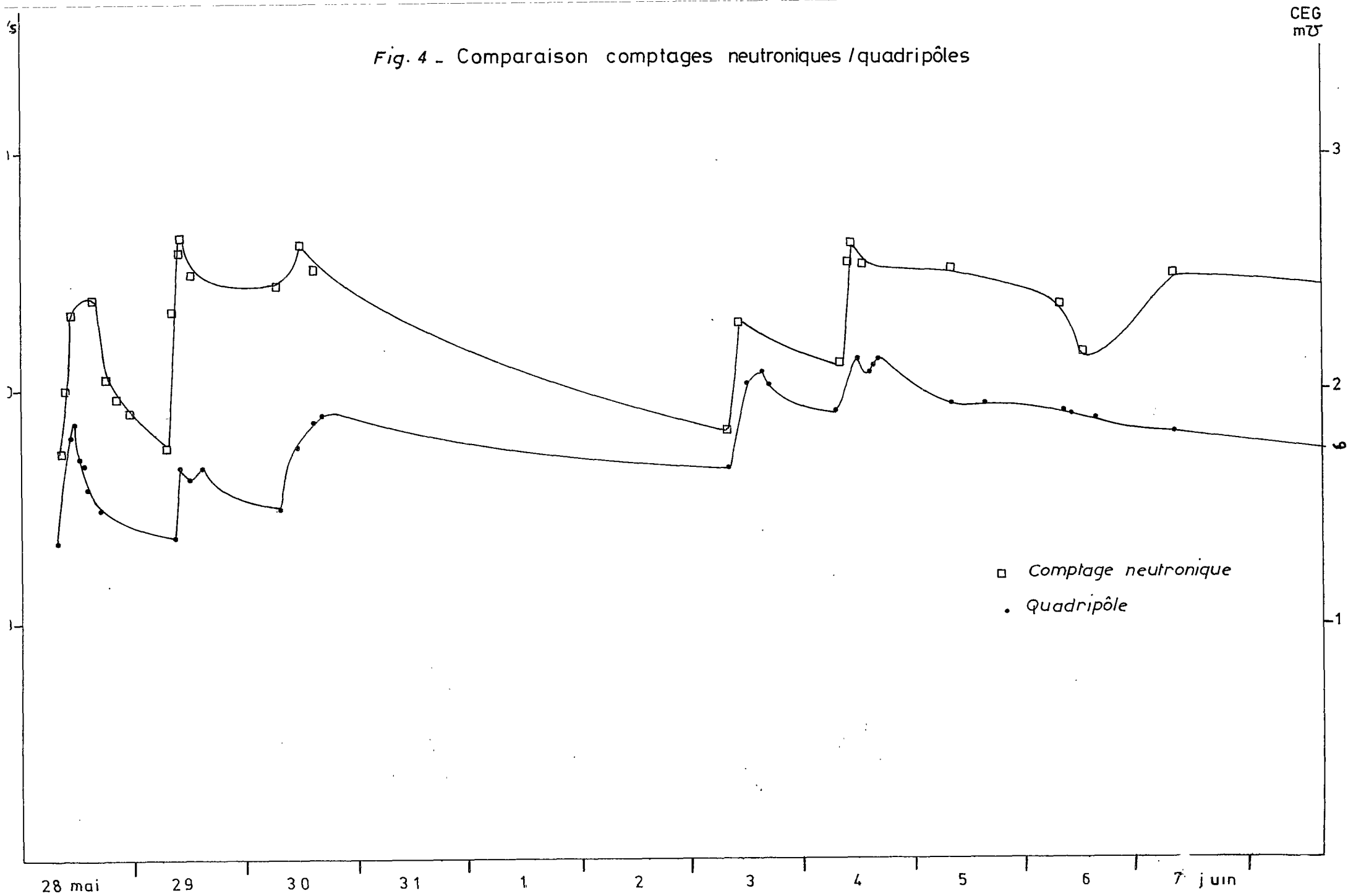
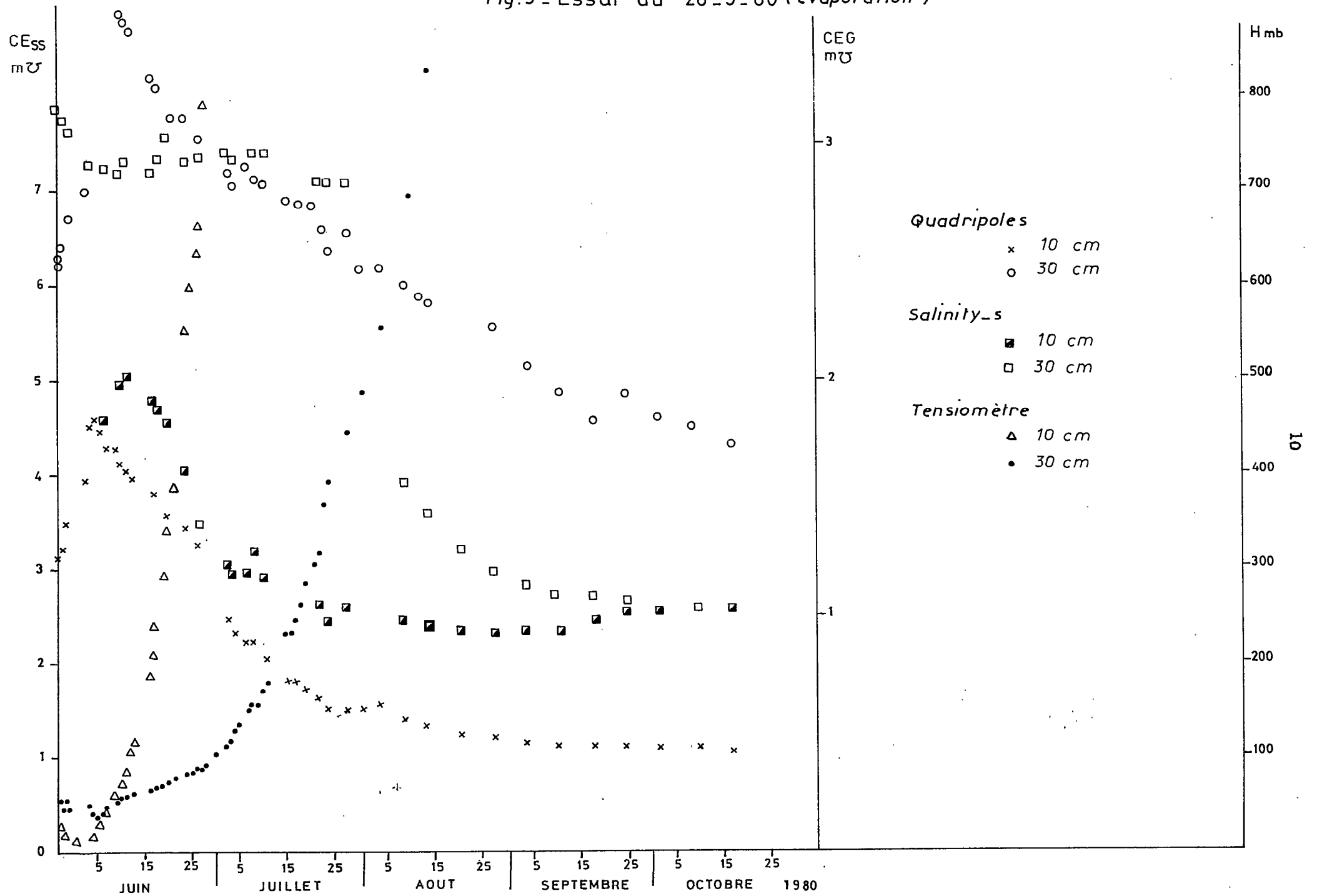


Fig.5 - Essai du 28_5_80 (évaporation)



a) - A 10 cm la baisse est très brutale ; d'une valeur de 9,6 mmhos, elle-même vraisemblablement produite par le lessivage instantané des sels accumulés près de la surface lors de la phase d'évaporation précédente, à 3,4 mmhos en 10 jours ; la baisse s'amortit ensuite fortement jusqu'à 3. On observe une légère remontée ultérieure due à un arrosage avec une eau légèrement plus salée, amenant une stabilisation aux environs de 3,5 mmhos pendant la redistribution de l'eau, le monolithe ayant été couvert à la fin des irrigations.

Lorsque le sol est ensuite soumis à l'évaporation, ce qui induit des flux importants vers le haut, on note une baisse assez rapide jusqu'aux environs de 1 mmhos en 20 jours, que nous expliquerons par le phénomène de lessivage vers le haut précédemment évoqué. Les valeurs mesurées inférieures à 1 que l'on observe ensuite semblent dues à un décrochement du capteur.

b) - A 30 cm l'effet de sursalure lié au lessivage des sels accumulés superficiellement est plus net et plus durable puis la diminution atteint le palier de 4 mmhos qui se maintient pendant près de 3 mois ; on observe ensuite une diminution régulière analogue à celle observée à 10 cm, mais décalée de deux mois.

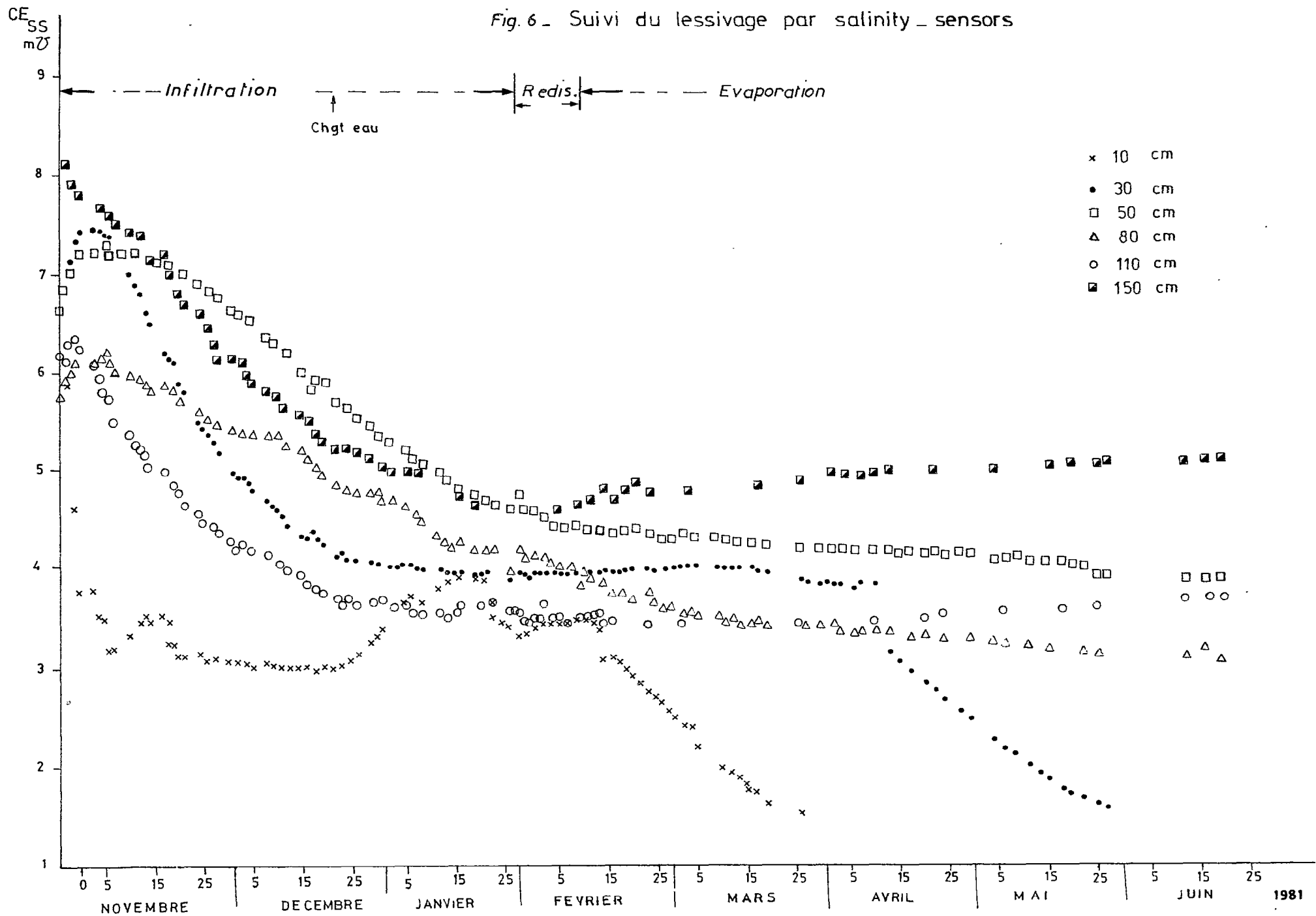
c) - A 50 cm l'effet lessivage s'amortit encore et la décroissance ultérieure est plus lente, se terminant par un amortissement vers 4,5 mmhos à la fin du lessivage puis 4 à 3,9 jusqu'en juin. On constate donc que l'inversion du flux sous l'influence de l'approfondissement du front de remontée capillaire se produit successivement 3 jours après le découvert à 10 cm, 2 mois après à 30 mais ne se manifeste pas encore à 50 cm au bout de 4 mois.

d) - A 80 cm l'allure est semblable à celle du niveau 50, mais la décroissance débute plus tôt et maintient la valeur à cette profondeur de 0,5 à 0,75 mmhos inférieure au niveau sus-jacent ; par ailleurs l'action du lessivage se prolonge environ un mois et demi de plus.

e) - A 110 cm on note un lessivage très précoce, plus que celui du niveau 30 et avec un palier au même moment ; il y aurait donc peut-être à cette profondeur un comportement particulier de la circulation.

f) - Enfin, à 150 cm, où la conductivité s'était maintenue à 8,4 mmhos depuis l'essai du 28-5-80, on constate un lessivage dès le début de l'arrosage, se terminant à 4,6 mmhos à la fin des irrigations ; on observe ensuite une remontée très graduelle, comme à 110, qui pourrait s'expliquer par une légère évaporation par la base du monolithe (?).

Fig. 6 - Suivi du lessivage par salinity_sensors



2 - Quadripôles (figure 7)

a) - A 10 cm on observe une remarquable stabilité pendant toute la phase de lessivage, correspondant à la mise à l'équilibre à saturation avec l'eau d'irrigation ; il se produit ensuite une décroissance lente simultanée à la baisse mesurée par le salinity-sensor.

b) - A 30 cm l'augmentation est sensible comme pour le sensor ; la décroissance est marquée d'irrégularités et se termine par une baisse lente et régulière.

c) - A 50 cm la montée est brève et suivie d'une décroissance assez rapide suivie d'une stabilisation autour de 1,5 mmhos.

d) - A 80 cm les variations sont de même allure, tout en restant à des valeurs légèrement inférieures, de même qu'à 150 cm.

e) - A 110 cm le fonctionnement est totalement anormal.

On note que pendant la phase d'évaporation la remontée est générale de 50 à 150 cm, alors qu'elle n'est observée qu'à 110 et 150 avec les salinity-sensors.

L'effet de la remontée capillaire est donc plus net sur les données des quadripôles que sur celles des sensors. Or on remarque (tableau I) que les variations des quadripôles suivent l'approfondissement du plan de flux nul donné par les tensiomètres. Il y a bien diminution progressive des teneurs en eau. Par contre les gradients de charge restent faibles et les eaux plus salées du fond du monolithe ne remontent que très lentement.

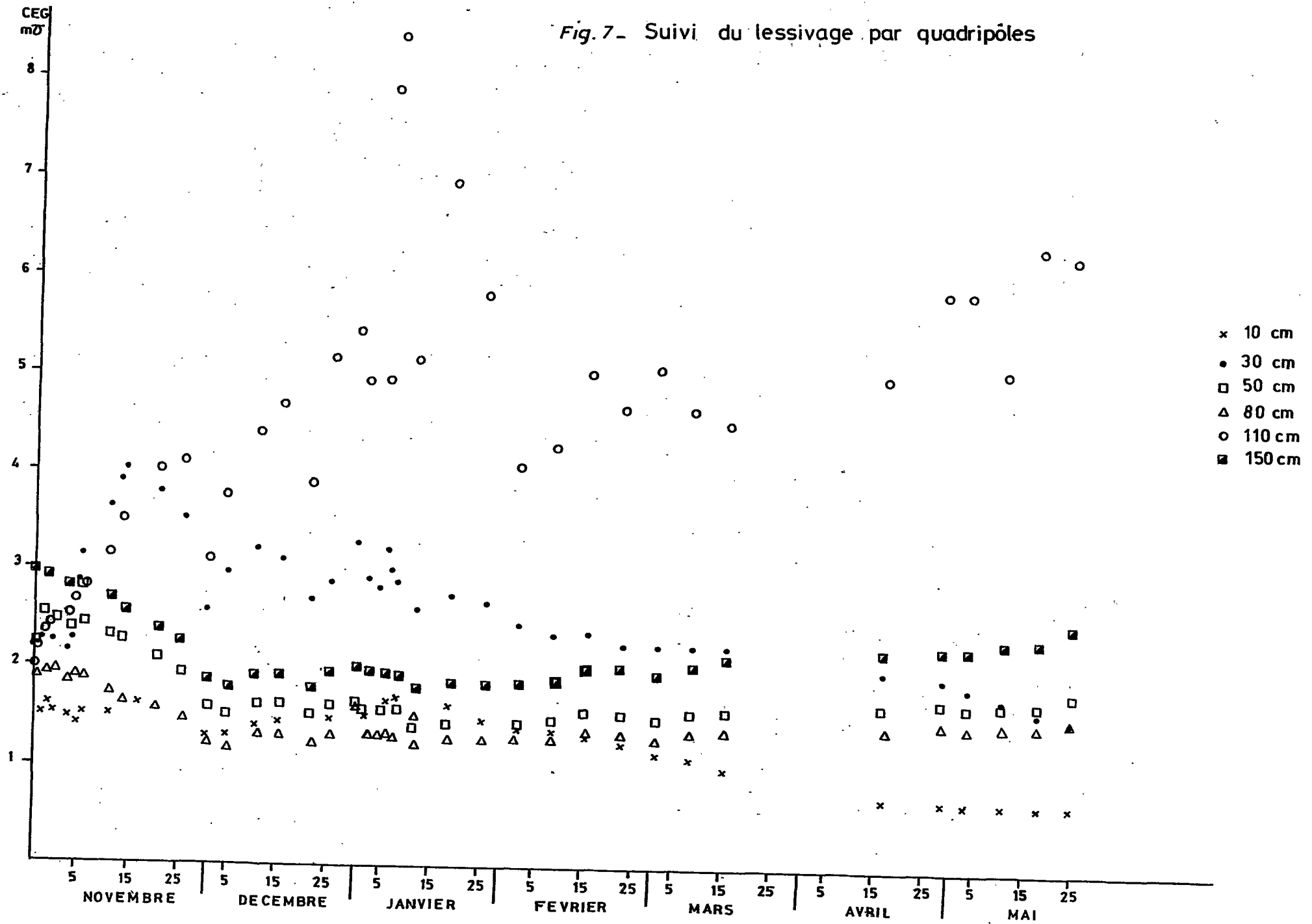
Tableau I

Profils tensiométriques en phase d'évaporation.

Date	12-02	09-03	17-04	29-04	11-05	18-05	25-05	12-06	16-06
10 cm	74	537	865	870	845	832	848	778	796
30 cm	63	106	280	478	668	733	806	738	734
50 cm	84	107	128	142	155	164	172	190	200
80 cm	103	117	128	131	137	141	144	148	147
110 cm	148	151	148	149	148	150	148	136	139
150 cm	158	158	155	154	154	154	152	144	146

Le plan de flux nul s'approfondit donc de 75 cm en 108 jours, soit une vitesse moyenne de 7 mm/j.

Fig. 7- Suivi du lessivage par quadripôles



Si l'on constate bien une ascension capillaire nette, on s'explique mal certaines des valeurs mesurées par les salinity-sensors. En effet, au découvert du sol, le profil de salinité est le suivant :

- 3,5 mmhos à 10 cm
- 4 " à 30 cm
- 4,6 " à 50 cm
- 4 " à 80 cm
- 3,5 " à 110 cm
- 4,6 " à 150 cm

Or, dès que le plan de flux nul atteint la profondeur de 20 cm le sensor à 10 cm accuse une baisse, alors qu'il doit recevoir une eau plus salée ; il en est de même à 30. Ces diminutions au dessous de 3,5 mmhos sont inexplicables. Deux hypothèses peuvent être avancées :

- ou bien les réactions du sensor sont anormales, mais on s'explique mal que la décroissance soit dans les deux cas régulière et à peu près identique.
- ou bien il faut admettre que les sensors ne reflètent les variations de conductivité que d'une fraction de l'eau en mouvement.

C) - Analyse de l'essai d'arrosage à l'eau salée du 20-10-81.

L'essai a consisté à mettre 20,82 l à 3,34 mmhos pour saturer le sol du 19 au 21-10, puis le sol est resté couvert jusqu'au 27. On a ensuite apporté 10 l d'eau à 6,78 mmhos du 27 au 30, après quoi le sol a été couvert jusqu'au 10-11, puis enfin 5 l à 56,71 mmhos les 10 et 11, suivi d'une phase de redistribution jusqu'au 19-11, date à laquelle le profil a été découvert.

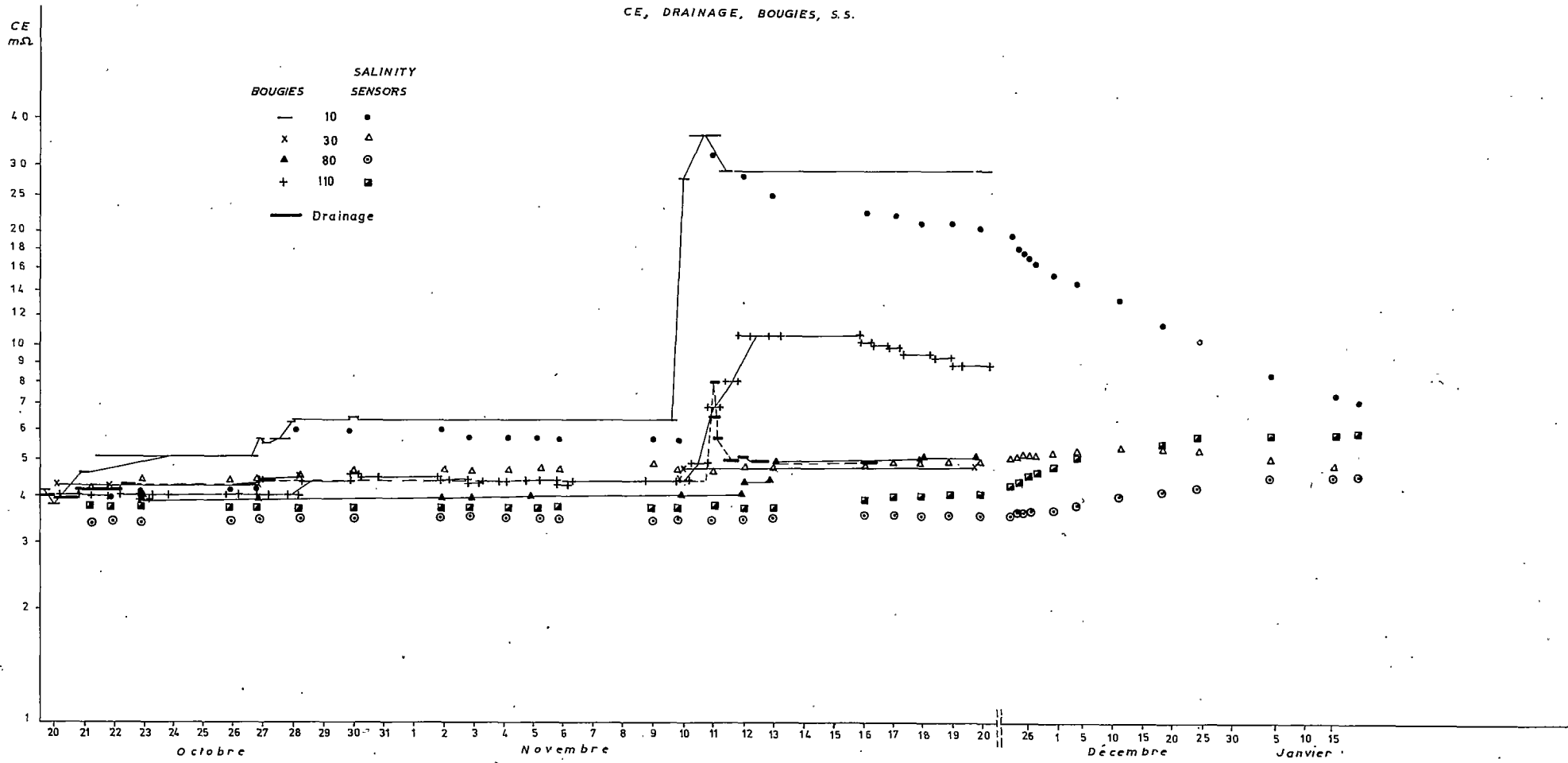
On a recueilli en drainage 14,77 l du 20 au 27, -7,324 l du 28-10 au 5-11 et enfin 3,055 l du 11 au 19-11. On remarquera que la saturation progresse toujours sensiblement d'un arrosage à l'autre, ce que l'on constate par les comptages neutroniques successifs à 5 cm (de 307,5 le 19-10 avant arrosage, à 443 puis 460 le 20, puis 486 le 21). Cependant l'augmentation du stock d'eau du monolithe de 16,67 l (différence entrées/sorties) n'est pas très perceptible sur les comptages.

1 - Conductivité des prélèvements (figure 8)

Dans le drainage on note seulement une faible augmentation après le premier arrosage, de 4 à 4,3 mmhos, puis à 4,45 après le second. L'effet de l'arrosage à l'eau la plus salée est cependant plus net, avec une montée très rapide à 8 mmhos suivie d'une stabilisation à 5 mmhos. On retrouve ici confirmation

Fig. 8 - Essai arrosage eau salée du 19/10 au 11/11/81

CE, DRAINAGE, BOUGIES, S.S.



du transit rapide, malgré les conditions pratiquement saturées, d'une partie au moins de l'eau d'arrosage, conformément aux résultats de l'essai de marquage au tritium (cf. 1ère partie ES 198)

Dans les bougies poreuses et les sensors, les rythmes de variation diffèrent encore :

- à 10 cm, de 1,67 mmhos quand le sol est sec, le sensor passe à 3,85 puis 4,12 mmhos après le premier arrosage, alors que la bougie passe seulement de 4 à 5 mmhos. Au cours du deuxième la bougie passe de 5,7 à 6,4 mmhos tandis que le sensor passe de 4,2 à 6 pour se stabiliser ensuite à 5,8 - 5,6 ; au cours du troisième il y a une assez bonne concordance, avec des maxima respectifs de 36 et 32 mmhos pour la bougie et le sensor. A ce niveau on observe donc une assez bonne concordance entre les deux types de capteurs, le sensor semblant seulement retardé de quelques heures et donnant des valeurs inférieures d'environ 10 %.

- à 30 cm, les évolutions sont conjointes et comparables: 4,4 à 4,7 et 4,9 mmhos pour la bougie du 1er au 3ème arrosage, contre 4,3 à 4,5 et 4,7 pour le sensor.

- à 80 cm, la bougie ne réagit pas avant le 3ème arrosage, passant de 4 à 5 mmhos, mais le sensor reste à 3,5 mmhos.

- à 110 cm, la réaction est surtout nette au 3ème arrosage, avec une "pointe" à 10,7 mmhos, le sensor ne dépassant pas, par contre, 4 mmhos !

En résumé on observe généralement un bon accord entre bougie poreuse et sensor à 10 cm avec de fortes variations ; l'accord n'est pas mauvais au dessous mais les variations y restent faibles, sauf à 110 où la bougie semble réagir à une circulation particulière, déjà suggérée par l'essai de marquage.

Il est également possible que des différences dans la compacité des horizons explique le freinage de la circulation entre 30 et 80 cm.

Il semble enfin que la séparation entre les différentes classes de porosité dont la circulation est détectée par le drainage à la base et par les bougies et les sensors, se fasse de plus en plus nettement du sommet vers la base, sans que l'on puisse donner d'explication simple de cette constatation.

2 - Evolution de la composition ionique des solutions recueillies.

On ne rentrera pas ici dans le détail de l'évolution géochimique de ces solutions, qui sera exposée dans un chapitre ultérieur. Il s'agira dans un premier temps de simples comparaisons, entre les eaux d'irrigation utilisées successivement et les eaux recueillies dans quelques bougies. On trouvera l'ensemble des résultats d'analyse dans le tableau II.

Tableau II

Evolution de la composition ionique des eaux
prélevées en bougies

Echan- tillons	Conductivi- té mmhos	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	Dates
Eau Irrig.	3,34	11,4	4,6	23,4	0,2	18,8	14,9	19 au 21-10
" " I	6,78	10,1	9,9	50,0	3,6	37,0	31,8	27 au 30-10
" " II	56,71	2,0	0,0	742,5	1,0	657,5	120,0	10 au 11-11
à 10cm BI								
1	4,19	12,2	8,7	23,4	0,8	22,7	17,0	20-10 à 9H
2	3,84	11,1	6,8	22,0	0,6	18,8	14,8	20-10 à 16H
3	4,65	14,1	8,9	24,7	0,7	22,7	20,0	21-10 à 15H
4	5,18	17,6	13,3	26,0	0,9	24,8	26,4	21 au 27-10
5	5,70	17,6	14,3	31,0	1,0	28,8	28,6	27-10 à 12H
6	5,58	17,6	13,3	37,0	1,0	29,4	28,6	27-10 à 16H
7	5,70	18,2	13,6	32,0	1,0	29,0	30,8	28-10 à 9H
8	6,28	18,5	14,5	35,5	1,0	35,0	26,8	28-10 à 12H
9	6,40	19,0	15,0	36,0	1,1	36,0	27,1	28-10 à 17H
10	6,40	19,5	13,5	36,0	1,1	39,5	26,3	28 au 30-10
11	6,51	18,8	15,1	38,0	1,2	36,0	30,0	30-10 à 15H
13	27,91	70,0	36,0	242,0	0,2	302,0	57,0	10-11 à 17H
14	36,05	74,0	32,0	367,0	0,5	392,0	81,0	11-11 à 15H
15	29,08	70,0	37,0	273,0	0,4	327,0	59,0	15 au 20-11
à 30cm BII								
1	4,36	15,5	8,5	22,4	1,4	26,2	15,6	20 au 27-10
2	4,42	16,3	11,7	22,4	1,2	31,2	16,0	27-10 au 10-11
3	4,77	16,8	13,1	23,4	1,2	32,8	15,8	10 au 20-11
à 80cm BIV								
1	4,07	12,8	7,2	22,4	0,2	19,0	16,3	20 au 23-10
2	3,95	11,7	7,3	22,4	0,2	20,0	15,6	23 au 27-10
3	3,95	12,0	8,0	22,4	0,2	20,6	16,0	27-10 au 2-11
4	3,95	12,2	7,7	22,4	0,2	20,8	15,4	02 au 03-11
5	4,01	13,0	9,0	22,4	0,2	22,3	15,8	03 au 05-11
6	4,04	14,1	5,9	21,1	0,2	21,2	16,1	05 au 10-11
7	4,04	14,1	5,9	21,7	0,2	20,2	16,5	10 au 12-11
8	4,40	15,7	4,2	22,4	0,2	22,2	15,6	12 au 13-11
9	4,99	18,7	5,2	24,4	0,2	30,0	14,7	13 au 18-11
10	5,11	20,0	4,0	25,0	0,2	23,8	13,9	18 au 20-11
à 110cm BV								
1	4,04	14,1	5,1	21,7	0,2	17,6	16,1	21-10 à 9H
9	4,04	14,6	7,3	21,7	0,2	21,8	15,2	27-10 à 19H
13	4,40	17,4	4,6	23,1	0,2	21,7	16,5	30-10 à 10H
14	4,58	17,8	5,2	23,7	0,2	20,7	17,7	30-10 à 16H
27	4,40	13,7	12,5	23,4	0,3	20,8	22,6	10-11 à 9H
29	4,93	14,6	15,3	24,8	0,3	25,6	22,5	11-11 à 9H
30	6,90	22,8	19,1	36,0	0,4	45,0	25,7	11-11 à 15H
31	8,09	31,1	18,8	50,0	0,5	67,5	25,5	12-11 à 9H
32	10,70	34,0	26,0	62,0	0,5	73,5	38,5	12-11 à 16H
33	10,70	29,1	30,9	68,5	0,4	76,7	41,5	13-11 à 9H
34	10,70	27,7	32,3	70,0	0,5	70,5	46,5	13-11 à 16H
35	10,70	25,8	31,2	68,5	0,5	73,5	42,0	13 au 16-11
36	10,11	24,3	28,7	66,5	0,5	64,8	41,5	16-11 à 17H

C'est évidemment à 10 cm que la mise à l'équilibre entre l'eau d'irrigation et la solution du sol, ou du moins sa fraction qui est captée par la bougie poreuse, est la plus rapide. La première eau ne provoque qu'une faible variation. La seconde réagit plus nettement et la solution du sol voit sa conductivité se rapprocher de celle de l'eau d'irrigation, mais il ne s'agit pas d'un simple remplacement volumique, ou plutôt le remplacement est très différent suivant les ions : Ca augmente plus vite que la concentration et Na moins vite, ce qui montre un échange entre ces deux ions.

On constate le même effet, mais notablement accru, avec la troisième eau, uniquement chlorurée sodique. Même si la conductivité de la solution du sol reste très inférieure à celle de l'eau d'irrigation, le passage en solution de Ca, ainsi que Mg et SO_4 , est évident. Il semble donc qu'à l'échange Na-Ca s'ajoute une certaine dissolution du gypse présent dans le sol.

Des effets identiques se retrouvent à 80 et 110 cm.

Quant au drainage (tableau III), les deux premières irrigations ne semblent pas avoir sur lui d'influence nette ; par contre l'arrosage avec l'eau très salée provoque une augmentation sensible de la conductivité, qui est un peu plus forte qu'à 110cm mais par contre plus tardive. A ce niveau on constate encore un échange Na-Ca et la dissolution du gypse.

3 - Evolution comparée de CE_{SS} et CEG.

L'influence de l'arrosage avec des eaux de concentration croissante est surtout importante à 10 cm où la CEG passe successivement à 1,9, puis 2,5 et enfin 7 mmhos (figure 9). Pendant le ressuyage le drainage interne des solutions chargées provoque une diminution d'abord rapide, puis atténuée, de la CEG. Dans le même temps la teneur en eau volumique passe de 51,4 à 49,5 % et la CE_{SS} de 32 à 21 mmhos. Pendant l'évaporation on observe encore une diminution de ces trois paramètres, mais par un phénomène contraire de lessivage par le haut.

A 30 cm l'effet est moins net, mais on remarque que la CE_{SS} croît encore notablement alors que la CEG reste assez stable. Le décalage avec les mesures à 10 cm est important.

A 50 cm l'amortissement est accentué mais CEG et CE_{SS} évoluent parallèlement, avec une croissance plus ou moins régulière que l'on retrouve aux autres profondeurs, sauf à 150 cm où les variations sont évidemment très atténuées.

D) - Essais de lessivage du 19-1 et du 29-3-82.

Pour entraîner les sels accumulés lors des irrigations précédentes, un 1er arrosage avec 8,5 l d'eau de la Medjerdah, de conductivité 3,58 mmhos a été pratiqué les 19 et 20 janvier.

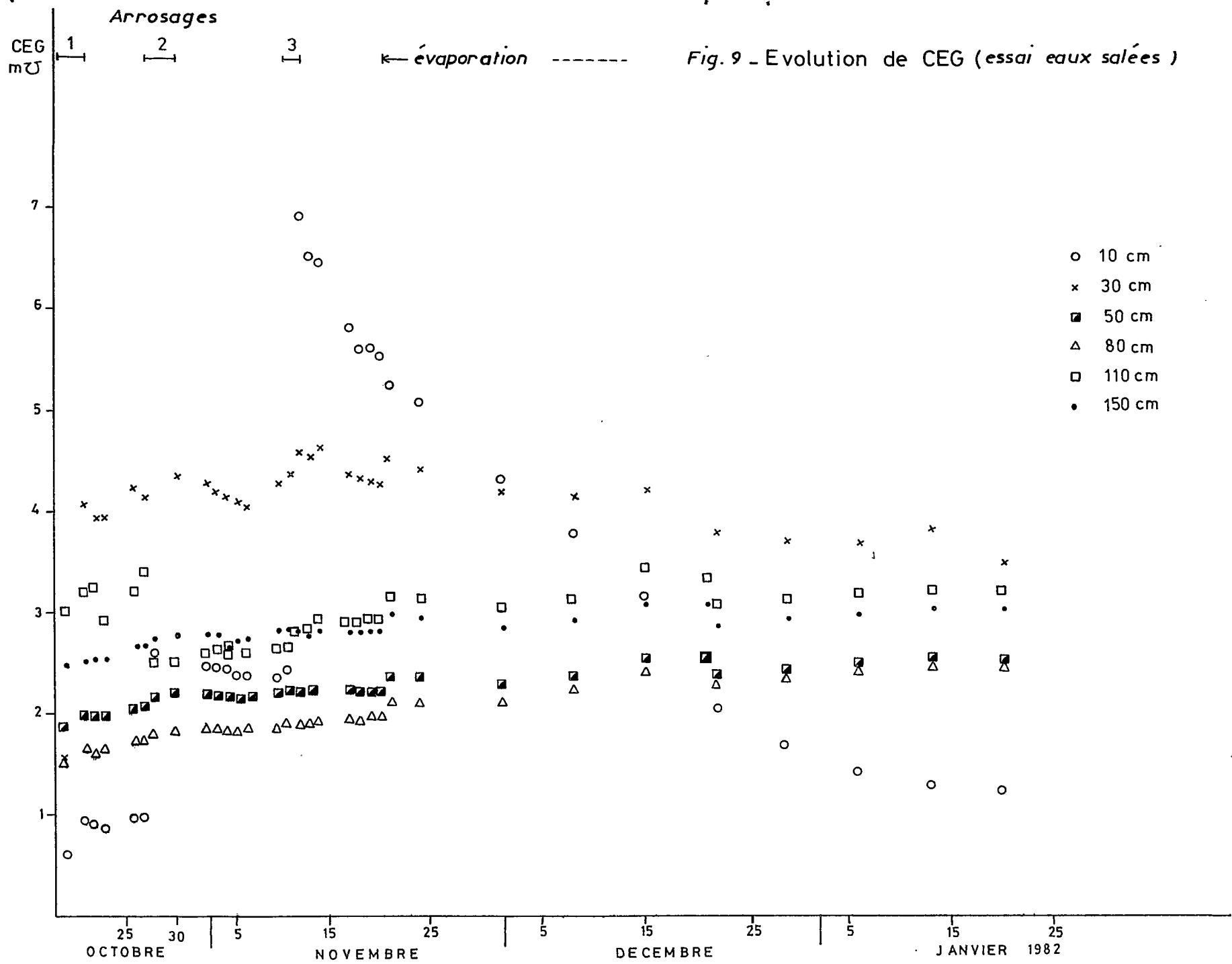


Tableau III

Evolution de la composition de l'eau de drainage

Echan- tillons	DATES	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CE mmhos
D ₁	20-10 à 9H	16,75	9,25	23,4	0,3	21,7	21,6	4,11
D ₈	21-10 à 9H	16,5	10,5	23,7	"	21,7	23,7	4,23
D ₁₁	22-10 à 11H	17,9	10,1	25,0	"	23,8	22,7	4,23
D ₁₅	28-10 à 9H	18,1	8,7	25,0	0,2	22,8	22,7	4,45
D ₂₀	31-10 à 9H	17,1	11,9	23,7	"	22,3	24,2	4,45
D ₂₆	11-11 à 9H	17,5	13,5	19,1	"	20,8	25,0	4,45
D ₂₇	11-11 à 10H	20,9	13,1	36,0	0,4	38,7	25,1	6,56
D ₂₈	11-11 à 12H	<u>23,9</u>	<u>16,1</u>	<u>47,0</u>	<u>0,6</u>	<u>55,5</u>	<u>31,7</u>	<u>8,01</u>
D ₂₉	11-11 à 16H	21,2	15,8	28,0	0,3	35,0	27,0	5,78
D ₃₁	12-11 à 9H	19,5	15,5	23,0	0,2	29,0	25,8	5,00
D ₃₃	12-11 à 17H	19,5	12,5	23,0	"	24,5	26,3	5,00
D ₃₇	19-11 à 17H	20,0	14,0	22,0	"	27,5	23,7	5,00

Au drainage (les bougies n'ayant pas été utilisées) recueilli du 20 au 27, on observe un tarissement progressif accompagné d'une diminution importante le 20 de la conductivité CE_d , de 9,7 à 5,7 mmhos, puis une stabilisation entre 5,4 et 5,7 jusqu'au 27.

Le lessivage est sensible à 10 cm, où la remontée rapide de CE_{SS} traduit le transfert des sels dissouts près de la surface. Il y a stabilisation pendant le ressuyage, mais à nouveau lessivage vers le haut ensuite, comme lors des expériences précédentes. Par contre à 30 cm on observe la stabilisation de la conductivité à un niveau supérieur, 6 mmhos au lieu de 4,8, traduisant un simple transfert limité à cette profondeur.

Le second lessivage a été pratiqué avec 28 l d'eau à 3,02 mmhos du 29 mars au 8 avril. Le lessivage est alors beaucoup plus régulier et amène la stabilisation à de nouvelles valeurs à tous les niveaux, nouvelles valeurs qui se groupent entre 5,6 et 6,3, sauf pour le niveau 30 cm où la CE_{SS} reste à 8,4. Le drainage se stabilise à 6,5.

III - Utilisation de la conductivité électrique globale pour l'estimation du bilan des sels.

A) - Interprétation de la conductivité électrique globale

Les méthodes utilisées depuis plusieurs années, notamment aux USA par l'équipe de Riverside (RHOADES et al 1971-1976-1977) ont été expérimentées en Tunisie et au Maroc sur le terrain.

Rappelons qu'il s'agit de trouver une relation entre la conductivité de la solution du sol, généralement référenciée à la conductivité de l'extrait de saturation, et la conductivité apparente, mieux encore appelée globale, obtenue par la méthode du quadripôle. Le rapport CEG/CE_{SS} variant avec l'humidité du sol, on devrait disposer d'autant de droites d'étalonnage que de teneur en eau. Cependant, comme cette relation met en évidence la contribution de la teneur en eau dans la valeur de CEG , il vient que cette dernière est ainsi fonction à la fois de la teneur en eau du sol et de la concentration de sa solution.

RHOADES et al (1976-b) ont ainsi étudié la variation du rapport ci-dessus avec la teneur en eau pour mettre en évidence une fonction plus explicite, de la forme :

$$CEG = f(\theta CE_{SS}, T, CE_s) \text{ ou } CEG = f(\theta CE_{SS}, T) + CE_s$$

T étant un facteur empirique de transmission liée à la tortuosité du milieu poreux et CE_s la fraction de conductivité liée à la réactivité du complexe d'échange du sol. T serait lui aussi proportionnel à la teneur en eau.

Plusieurs points discutés dans des publications récentes amènent à reconsidérer cette formulation :

- la conductivité de l'extrait de saturation ne serait pas proportionnelle à la conductivité de la solution du sol, au facteur de dilution près, en raison de dissolution possible de sels peu solubles, comme le gypse, dans l'extrait de saturation, dont la teneur en eau est toujours largement supérieure à la saturation réelle "in situ" (NADLER 1981),
- la conductivité des surfaces d'échange (CE_s) ne serait pas constante, mais varierait en fonction de la concentration et de la composition de la solution du sol (NADLER et al 1980).
- la relation CEG/CE_{SS} ne serait pas entièrement linéaire, notamment pour les faibles conductivités inférieures à 3 mmhos (SHAIN BERG et al 1980).

Ces éléments ne seront pas repris dans ce rapport où l'on s'est plutôt orienté sur la recherche d'une relation empirique entre la CEG et la teneur pondérale en sels effectivement dissouts.

B) - Extension à l'estimation de la teneur en sels du sols

Dans la tentative de relier CEG et CE_{es} ou CE_{ss} , c'est-à-dire respectivement la conductivité globale à la conductivité de l'extrait de saturation ou de la solution du sol, on a remarqué (EL OUMRI 1978) que l'ordonnée à l'origine de la relation CEG/CE_{es} à teneur en eau constante, rapportée à la conductivité des surfaces d'échange (CE_s), n'était importante vis à vis de CE_{es} que pour les sols franchement alcalins.

Pour l'ensemble des sols salés et faiblement alcalinisés, il semble que l'on puisse négliger cet élément. Ceci simplifierait l'expression en :

$$CEG = f(\theta CE_{SS}, T)$$

Par référence au mode d'estimation de la teneur en sels du sol en g/kg (USDA 1954), on peut imaginer que la conductivité globale soit proportionnelle au produit des deux composantes de la teneur pondérale en sels, soit au produit ($\theta \times CE_{SS}$), lui-même approximativement égal au produit ($PS \times CE_{es}$), compte non tenu de l'observation citée en III-A.

Cette hypothèse simplificatrice s'est trouvée étayée, d'une part grâce à l'étude des corrélations entre CEG et teneur en sels s'appuyant sur la mesure de la conductivité de l'extrait de saturation d'échantillons de sols prélevés lors des mesures électriques sur le terrain, d'autre part à l'aide d'une série d'expériences réalisées par EL OUMRI (1981), où cet auteur a montré que pour une assez large gamme d'humidité où le produit ($CE_{SS} \times \theta$) reste constant, la CEG mesurée au laboratoire est elle-même constante.

C) - Application à l'étude de l'évolution du bilan des sels du monolithe au cours des expériences d'infiltration.

Tant sur le terrain qu'au laboratoire, les variations de la conductivité de la solution du sol et de la teneur en eau n'ont pu être encore vérifiées d'une manière continue. On s'est donc proposé de vérifier les relations ci-dessus à l'aide d'une observation presque continue que seul permettait l'utilisation d'un monolithe. Ce dispositif permettait en effet de contrôler aisément l'évolution des divers paramètres de la salure, à l'aide des salinity-sensors, des bougies poreuses et des sondes quadripolaires, ainsi que des facteurs de variations, teneur en eau et température.

1 - Elaboration des données.

On a vu dans les rapports précédents (VIEILLEFON et al 1982, VALLES et al 1982) que la teneur en eau estimée par comptage neutronique subissait des variations aléatoires nécessitant un lissage au cours des différentes phases d'infiltration, de redistribution et d'évaporation des expériences réalisées. En pratique, les comptages à chaque niveau, préalablement corrigés de la variation du comptage de la sonde à neutrons dans l'eau, ont été corrélés avec le temps sous la forme de droites ou portions de droites d'équation.

$$N = a \log t + b$$

De même, la mesure très précise des températures à l'aide des thermistors associés aux salinity-sensors, a permis de mettre en évidence des cycles de variation qui ont servi à ajuster la mesure de la CEG à 25°C, température de référence.

Les comptages ajustés par lissage ont ensuite servi au calcul de la teneur en eau à chaque profondeur de mesure de la salure par la teneur en eau moyenne entre les deux couches de 10 cm situées de part et d'autre de chaque niveau. La teneur en sels est calculée par :

$$TS \% = CE_{SS} \times \theta \times 0,064$$

0,064 étant le facteur de proportionnalité moyen entre la conductivité d'un ensemble de sels solubles et leur concentration dans l'eau (USDA 1954).

De même les températures mesurées par les thermistors et les coefficients de cellule des sondes quadripolaires sont intervenues dans le calcul de la CEG à partir de mesures de résistance des sondes.

2 - Influence limitée de la teneur en eau

Pour deux essais importants, on a étudié la relation entre CEG et CE_{SS} , exprimées en mmhos pour le niveau 10 cm :

$$CEG = 0,387 CE_{SS} + 1,777 \quad r = 0,982$$

$$CEG = 0,406 CE_{SS} + 1,720 \quad r = 0,982$$

Ces deux relations sont assez voisines, mais comporte toutes deux un assez fort reliquat pour $CE_{ss} = 0$, qui s'expliquerait par le fait que la relation n'est pas linéaire pour les faibles conductivités de la solution du sol (SHAINBERG et al 1980). On notera également que ces relations ont été obtenues à partir de teneur en eau différentes.

Si l'on examine l'influence de la teneur en eau sur le rapport CEG/CE_{ss} , ou mieux sur le rapport $CEG/(CE_{ss} \times \theta_p)$, de la conductivité globale sur la teneur en sels, on obtient :

$$CEG/(CE_{ss} \times \theta_p) = 0,688 \theta_p - 1,92$$

θ_p variant, au cours de cette expérience, de 0,35 à 0,40.

Ce rapport ne varie donc là que de 0,0344, soit environ 2 pour 100. Une extrapolation à la gamme d'humidité saturation-capacité au champ ne devrait donc pas dépasser 5 pour 100 de variation pour ce niveau du sol, ce qui nous semble négligeable eu égard à la précision des mesures.

3 - Procédure de calcul à l'aide d'un micro-ordinateur

Le suivi de l'infiltration, du ressuyage et de l'évaporation, dans le contexte relativement simple du monolithe, conduit cependant rapidement à l'accumulation de calculs simples mais répétitifs, puisque concernant respectivement chaque jour, sur des périodes de plusieurs semaines à plusieurs mois :

- pour la teneur en eau : 15 points de mesure par comptage neutronique avec 2 ou 3 répétitions par niveau, à quoi s'ajoutent une dizaine de comptages dans l'eau effectués avant et après la série dans le sol, soit environ une soixantaine de mesures.

- pour les sondes quadripolaires : 6 mesures de résistance et 6 mesures pour le thermistor, pour calcul de la CEG selon la formule :

$$CEG = \frac{K}{R} \times \frac{RT}{k}$$

K étant la constante de la sonde, R sa mesure de résistance, k la constante du thermistor à 25°C et RT sa résistance, soit en tout environ 80 mesures par jour le calcul de 18 valeurs élaborées (CEG, % sels, θ_p).

Les calculs ci-dessus sont simples et aisément réalisés à l'aide d'une calculatrice programmable ou non, mais nécessitent de nombreuses entrées successives. De nombreuses erreurs de report ou de manipulations sont malheureusement possibles et les temps de calcul sont très longs.

Une procédure de calcul et d'édition a donc été mise au point à l'aide d'un ordinateur "de poche" (type PC 1211 SHARP), muni d'une interface cassette-imprimante, par la séparation du travail en deux phases.

Dans la première phase, les données brutes sont enregistrées sur cassette à l'aide d'un programme qui "questionne" l'utilisateur : après avoir introduit la date des mesures, l'ordinateur demande successivement :

- les comptages "dans l'eau" précédant et suivant les mesures sur le sol qui sont entrées au début en répondant aux questions "N-eau D=" et "N-EAU F = ", autant de nombres à prendre en compte, et en répondant par un 0 (zéro) à la fin de chaque séquence ; le programme calcule alors la moyenne de chaque séquence et leur différence,

- les comptages "sol", soit successivement "N-5=", "N-15=", ..., le programme effectuant le calcul de la moyenne pour chaque niveau, puis enregistre, sur cassette les données de comptage (eau et sol).

Le programme poursuit en demandant, par séquence suivie d'enregistrement, les valeurs de résistance des sondes quadripolaires des 6 niveaux (R-1 à R-6), des thermistors (RT-1 à RT-6) et des salinity-sensors (SS-1 à SS-6). La séparation des séquences de mesures de nature différente permet une correction plus aisée si nécessaire.

Dans la seconde phase, un autre programme traite les données auparavant enregistrées, d'une part pour calculer les valeurs élaborées concernant la teneur en eau (HP ou HV), la CEG et la teneur en sels et les imprime sur un tableau journalier très maniable. Il peut aussi accumuler ces données en calculant moyennes, carrés et produits pour les calculs de régression.

Pour ce faire ce programme comporte les constantes et les équations nécessaires aux calculs.

Pour la teneur en eau par exemple, la programme calcule le comptage corrigé de la valeur eau, cette valeur étant régulièrement incrémentée d'un niveau à l'autre de $1/15$ de la différence entre les moyennes des comptages "eau" effectués avant et après les mesures "sol". La teneur en eau est alors calculée pour chaque niveau et conservée en mémoire. Elle est ensuite utilisée pour le calcul de la teneur en sels.

Dans le cas, dont il a été question plus haut, où les valeurs de N et RT sont entâchées d'une grande variabilité, un programme annexe calcule des lissages, soit en fonction du logarithme du temps, soit par des moyennes décalées. Le programme de traitement tient alors compte de la numérotation des jours qu'il est utile de prévoir dans le programme d'entrée de la première phase, et calcule des valeurs journalières corrigées avant de les utiliser pour le calcul de la teneur en eau et de la CEG.

Les principaux avantages de cette procédure sont les suivants :

- chaque donnée n'est entrée qu'une seule fois et peut être immédiatement contrôlée à l'affichage,

- les données sont toutes stockées sur bande et sont donc disponibles pour tout traitement ultérieur ; elles peuvent y être corrigées aisément,

- tous les calculs sont effectués rapidement par la machine puisque constantes et équations sont introduites par le programme,

- certaines erreurs éventuelles peuvent être détectées, à l'aide du "formatage" des résultats, par l'élimination des nombres comportant plus de chiffres avant la virgule que prévu, et par l'introduction de seuils minima,

- enfin tous les calculs de la seconde phase sont automatiques, de même que l'impression des résultats, sans intervention de l'opérateur, de qui fait gagner un temps considérable.

4 - Résultats obtenus

Si l'on se reporte aux figures 10 et 11 on peut constater que la teneur en sels du sol, calculée par méthode ci-dessus, évolue parallèlement à la CEG, notamment à 10 cm où les gammes de variation de CEG, CE_{SS} sont les plus amples.

Les corrélations obtenues pour différents essais sont assez bonnes mais de qualité inégale suivant les niveaux (tableau III bis et figure 12).

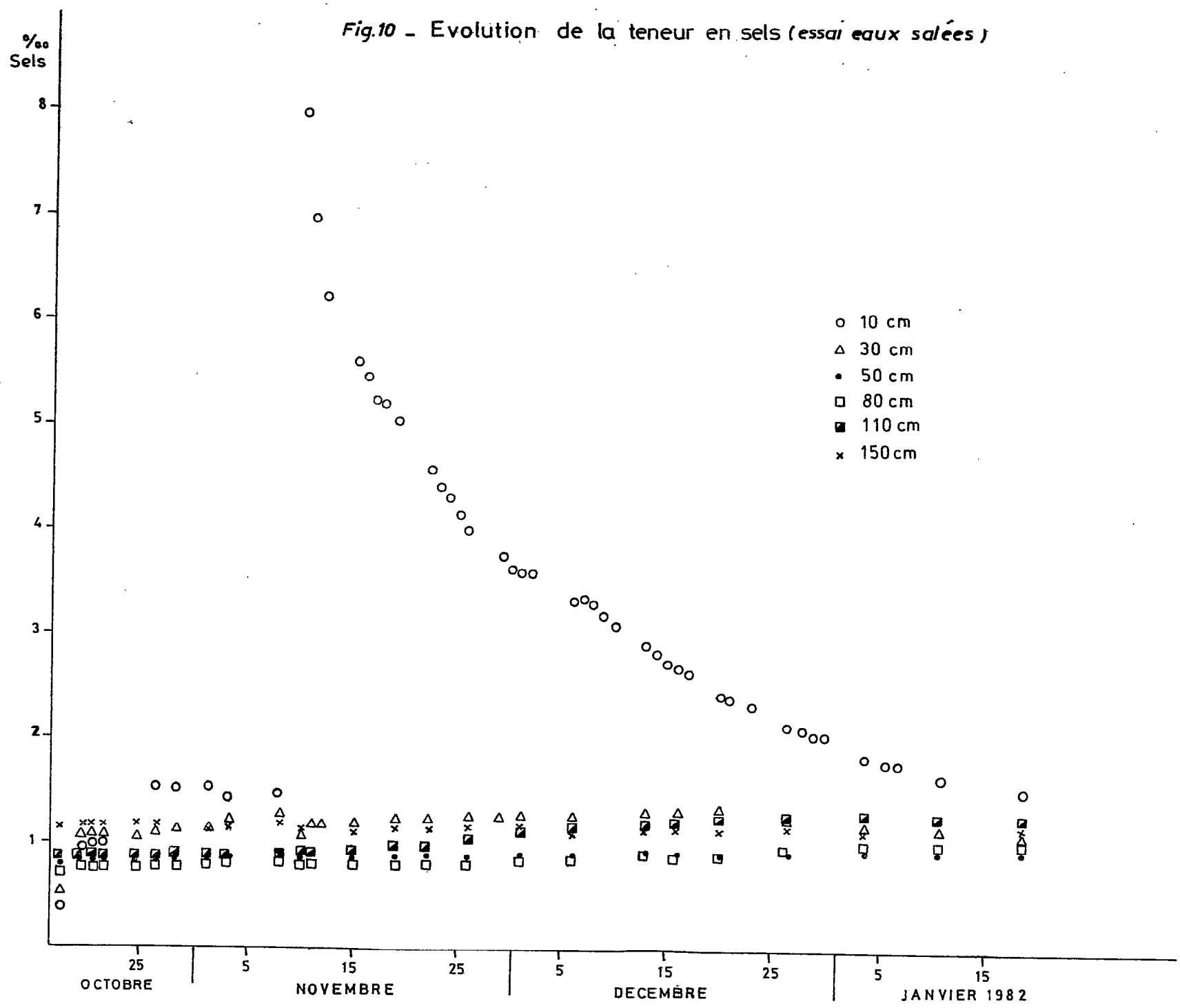
Rappelons cependant qu'il s'agit là d'une relation expérimentale qui ne prend en compte qu'un nombre limité de facteurs. Cependant le bilan des sels peut en être tiré d'une manière satisfaisante.

A titre d'exemple, on trouvera dans le tableau IV différents profils de salure et de teneur en sels pour certaines périodes de l'essai d'arrosage avec l'eau salée du 11/11/81.

On a porté dans la partie supérieure les valeurs de la conductivité de la solution du sol (CE_{SS}), mesurée à l'aide des salinity-sensors, de la teneur en sels ‰ (TS) calculée à partir de CE_{SS} et de la teneur pondérale en eau mesurée par neutronométrie, ainsi que l'estimation de la quantité de sels contenue dans la tranche de sol correspondante (Q). Dans la partie inférieure sont portées la valeur de la conductivité globale (CEG) mesurée aux mêmes niveaux, la teneur en sels calculée à l'aide des équations de régression établies (TSC) et la quantité de sels de chaque couche (QC).

Une première constatation apparaît à la lecture de la partie supérieure : la somme des poids de sels calculés pour chaque

Fig.10 - Evolution de la teneur en sels (essai eaux salées)



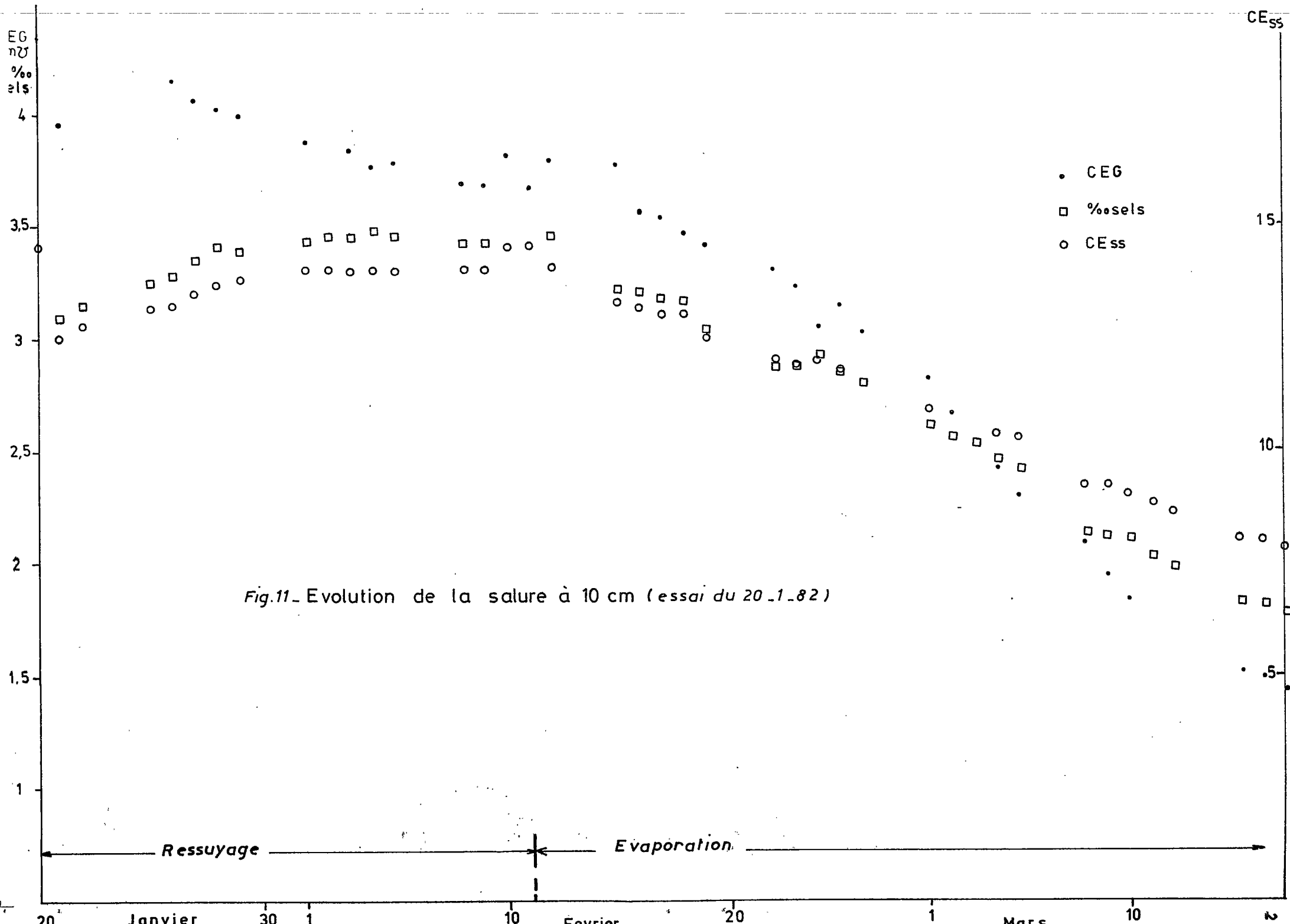


Fig.11 - Evolution de la salure à 10 cm (essai du 20.1.82)

Fig.12 - Corrélation CEG / ‰ sel à 10 cm
(N et RT lissés)

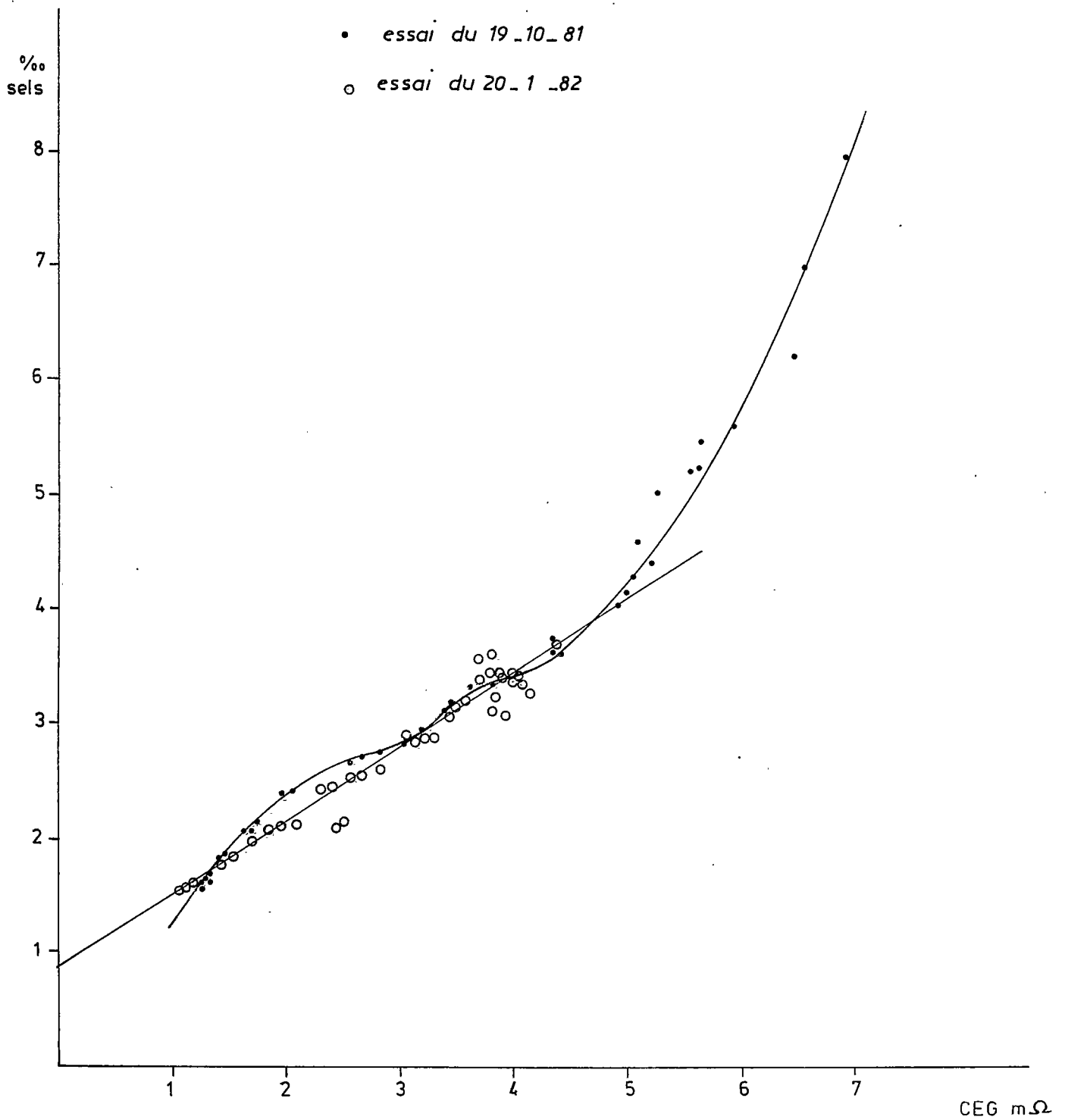


Tableau III bis
Corrélations CEG/Teneur en sels

Niveau 10 cm		r
- avant lissage N	% sels = 0,937 CEG - 0,120	0,937
- après lissage N) - avant lissage RT)	% sels = 0,861 CEG - 0,395	0,965
- après lissage RT	% sels = 0,855 CEG + 0,428	0,967
Niveau 30 cm	% sels = 0,318 CEG + 0,604	0,988
Niveau 50 cm	% sels = 0,234 CEG + 0,232	0,852
Niveau 80 cm	% sels = 0,357 CEG + 0,071	0,916
Niveau 110 cm	% sels = 0,725 CEG - 0,159	0,756

tranche permet de saisir l'évolution des phénomènes. Ainsi la différence entre les Q des jours 0 et 1, soit $(675,6 - 338,9) = 336,7g$, est assez proche de la quantité de sels injectée, soit 319 g.

Ceci est encore plus net si l'on ne considère que les deux couches supérieures (0-20 et 20-40 cm) où le bilan d'entrée est meilleur :

$$\begin{aligned} & (70,8 + 61,8) + 319 = 451,6 \\ \text{contre} & \\ & (399,6 + 63,4) = 463 \end{aligned}$$

Le 7^{ème} jour, on ne trouve plus que 553,3 g de sels sous forme soluble, à quoi il faut ajouter 12,2 g récupérées dans le drainage. Les 92,4 g qui manquent par rapport au jour 0 correspondent vraisemblablement à une précipitation importante. Cette précipitation semble s'accroître encore pour aboutir à un "déficit" de 235,3 g le 30^{ème} jour et de 329,2 g le 70^{ème} jour, valeur voisine de la quantité apportée le 11/11/81. Tout se passe donc comme si le sel dissout dans une assez faible irrigation, après être entré plus ou moins profondément dans le profil, était ensuite remonté par ascension capillaire due à l'évaporation, tout en précipitant partiellement au sein du profil, mais beaucoup plus intensément près de la surface.

Cette hypothèse est justement vérifiée lors de l'arrosage ultérieur à l'eau peu salée (jour 72), qui a surtout pour effet de dissoudre les sels précédemment déposés et de les entraîner plus profondément. On retrouve en effet ce jour-là 546,4 g, à quoi il faut ajouter 17,1 g recueillis dans le drainage, soit un total de 563,5 g, très proche du bilan du 7^{ème} jour de l'arrosage précédent. Les jours suivants, dont les résultats ne sont pas portés dans le tableau, confirment cette évolution, la somme (sels du sol + sels du drainage) de chaque jour restant très proche de la teneur du

	JOUR 0			J 1			J 7			J 30			J 70			J.72		
	CE _{SS}	TS%	Qg	CE _{SS}	TS%	Qg	CE _{SS}	TS%	Qg	CE _{SS}	TS%	Qg	CE _{SS}	TS%	Qg	CE _{SS}	TS%	Qg
0 - 20	5,6	1,41	70,8	32,0	7,96	399,6	22,0	5,48	275,1	13,4	3,18	125,3	7,1	1,53	60,1	14,5	3,73	187,2
20 - 40	4,7	1,14	61,8	4,7	1,17	63,4	4,9	1,20	65,0	5,3	1,29	50,7	4,6	1,08	42,4	5,4	1,51	81,8
40 - 65	4,2	0,85	52,4	4,3	0,87	53,6	4,3	0,86	53,0	4,6	0,92	36,1	4,9	0,96	37,7	4,9	1,09	67,1
65 - 95	3,4	0,76	41,9	3,5	0,78	43,0	3,5	0,79	43,6	3,9	0,87	59,8	4,5	0,99	48,6	4,6	1,13	62,4
95 - 130	3,7	0,84	46,2	3,8	0,89	49,0	3,9	0,90	49,6	5,3	1,19	81,8	5,8	1,29	88,7	5,8	1,33	73,2
130 - 160	4,8	1,12	65,8	4,8	1,14	67,0	4,9	1,14	67,0	4,9	1,13	66,6	5,1	1,17	68,9	5,1	1,27	74,7
	CEG	TSC	QC	CEG	TSC	QC	CEG	TSC	QC	CEG	TSC	QC	CEG	TSC	QC	CEG	TSC	QC
0 - 20	2,43	2,50	125,5	6,93	6,35	318,8	5,61	5,22	262,0	3,45	3,38	169,7	1,24	1,49	74,8	3,64	3,54	177,7
20 - 40	4,34	1,36	73,7	4,60	1,42	77,0	4,33	1,36	73,7	4,00	1,28	69,4	3,47	1,15	62,3	3,64	1,19	64,5
40 - 65	2,26	0,87	53,6	2,24	0,87	53,6	2,22	0,86	53,0	2,37	0,90	55,4	2,53	0,93	57,3	2,69	0,97	59,7
65 - 95	1,90	0,74	41,9	1,90	0,74	41,9	1,94	0,76	43,0	2,24	0,87	49,2	2,46	0,95	53,8	2,56	0,98	54,9
95 - 130	2,65	0,76	44,1	2,81	0,87	50,5	2,93	0,96	55,7	3,16	1,13	65,5	3,23	1,18	68,4	3,28	1,22	67,2
130 - 160	4,85	0,91	51,0	2,80	0,87	48,7	2,80	0,87	48,7	2,91	0,95	53,1	3,05	1,05	58,8	3,24	1,20	70,0
Total			338,9			675,6			553,3			440,3			346,4			546,4
TCalculé			389,8			600,5			536,1			462,3			375,2			494,0

TABLEAU IV - Bilan des sels

du sol du jour précédent.

La seconde constatation est que l'estimation de la teneur en sels à partir de la CEG est assez satisfaisante, puisque la bilan calculé du profil ne s'écarte jamais de plus de 13% du bilan apparent. Ce chiffre peut paraître élevé, mais il faut se rendre compte que nous ne disposons que d'une seule mesure par couche, sauf pour la teneur en eau, et que les différents capteurs ont des sphères d'influence très différentes.

CONCLUSION

L'utilisation de capteurs "in situ" permet une observation non destructive et continue de divers paramètres du sol et se prête bien à l'étude de la dynamique des eaux et des sels dans un monolithe de sol non perturbé.

L'étude de la forme et de l'amplitude des variations de différentes mesures de la conductivité permet de mettre en évidence quelques faits significatifs :

- il n'existe pas une seule solution du sol, homogène en toute partie du sol, mais plusieurs, associées à différentes classes de porosité et donc de vitesses de circulation différentes, qui sont naturellement en relation et se différencient plus ou moins suivant la teneur en eau, donc le taux de remplissage de ces différentes porosités, et aussi suivant la nature de l'eau d'irrigation utilisée,
- les différents capteurs permettent de saisir les différentes phases de la dilution ou de la concentration de la solution, ainsi que les phénomènes de dissolution et de précipitation des sels,

enfin la conductivité électrique globale, mesurée à l'aide des sondes quadripolaires, s'avère une estimation valable du stock de sels effectivement dissouts, présents dans le sol.

2ème partie : Caractérisation chimique des solutésCHAPITRE IDispositif expérimental et méthodes de mesure.I - Composition minéralogique et caractéristiques chimiques.

Il s'agit d'un sol argileux hétérogène développé sur les alluvions de l'oued Medjerdah. Le teneur en calcaire total est élevé (45 %) et constante dans tout le profil. Tous les horizons présentent des traces de gypse (tableau V).

La fraction argileuse est essentiellement composée de montmorillonite et d'un peu d'illite. La teneur en argile et limon fin (0-20 u) est supérieure à 60 %.

Profondeur (cm)	0 - 20	20 - 40	40 - 80	80 - 120
Teneur en argile et limon fin	60% à 70%	70% à 80%	60% à 70%	60% à 70%

II - Equipement du monolithe

L'équipement installé sur le monolithe en vue de la détermination des caractéristiques hydrodynamiques est décrit dans la seconde partie. (VALLES et al 1981). Pour les mesures chimiques, on dispose de salinity-sensors aux profondeurs de 10,30,50,80,110 et 150 cm, de sondes quadripoles et de bougies poreuses à 10,20,30,50,80 et 110 cm.

L'utilisation des bougies poreuses est délicate. En effet, les solution sont prélevées très lentement et il peut se produire en dégazage. Les calculs effectués sur la solubilité de la calcite, de la magnésite et la pression partielle en CO₂ peuvent être affectés. Aussi on préfère utiliser les résultats obtenus à partir de l'eau de drainage.

La base du monolithe est constituée d'un lit de gravier de 10 cm. Les solutions arrivant à la base du profil sont drainées par ce réseau et évacuées par un conduit. On peut ainsi mesurer les débits et recueillir l'eau pour l'analyse.

III - Caractéristiques chimiques des eaux d'irrigation

L'eau utilisée le plus souvent pour l'irrigation du monolithe est celle de l'Oued Medjerdah, dont la composition chimique a été portée ci-dessous :

	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
Concentration mmoles / l	0,22	23,40	5,70	2,30	20,72	7,45	8,1

Profondeur (cm)		0-20	20-40	40-80	80-120	120-150	
pH - pâte sat.		7,8	7,8	7,8	7,6	7,8	
CaCO ₃ total %		46	45	45	45	44	
CaCO ₃ actif %		17,0	17,3	15,8	11,3	13,0	
CaSO ₄ - 2H ₂ O %		1%	1%	1%	1%	1%	
C %		1,23	-	-	-	-	
N %		0,13	-	-	-	-	
Mat. org. %		2,1	-	-	-	-	
Rapport C/N		9,5	-	-	-	-	
EC _e en mmhos/cm 25°C		1,1	1,7	4,8	9,3	9,8	
SP %		58	59	56	50	52	
Composition de l'extrait saturé mē/l		Cl ⁻	3,9	6,6	24,7	59,9	64,3
		SO ₄ ⁻⁻	4,8	7,6	29,9	48,7	50,9
		HCO ₃ ⁻	3,9	3,7	2,3	1,7	1,6
		Ca ⁺⁺	4,4	5,3	17,5	31,4	33,0
		Mg ⁺⁺	1,1	1,6	7,5	19,6	21,7
		K ⁺	0,5	0,4	0,4	0,5	0,6
		Na ⁺	6,3	10,3	31,4	61,7	64,6
Comple- xe ab- sorbant	me/ 100 g sol	Mg ⁺⁺	1,8	2,4	2,6	2,5	2,7
		K ⁺	1,2	0,9	0,5	0,4	0,5
		Na ⁺	0,6	1,1	1,5	1,8	2,1
		T	19,5	18,2	15,4	13,4	15,8
	%	Na/T	3,1	6,0	9,7	13,4	13,3

Tableau - V : Analyse chimique du sol de la station de Cherfech - extrait du Rapport UNESCO 1970.

Il s'agit d'une eau chlorurée sodique. Les sols irrigés avec cette eau évolue vers la vofe saline neutre (CHEVERRY - 1974) les pH sont à peu près constants et les problèmes de perméabilité sont réduits.

D'autres eaux ont été utilisées pour l'irrigation. Ce sont des solutions synthétiques très salées dont la composition chimique est voisine des termes ultimes observés dans les sols salés de la vallée de l'Euphrate.

	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
Solution n°1	1,80	50,00	5,05	4,95	37,80	15,90	7,9
Solution n°2	0,97	742,50	1,00	0,00	622,47	60,00	7,4

CHAPITRE II

Résultats expérimentaux

I - Description de l'essai du 20 Octobre 1981

Cet essai fait suite à celui du 14 Juillet 1981 qui avait pour but de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du sol (VALLES et al 1981). A cette date, le monolithe a été saturé en eau puis a subi un drainage interne pendant 20 jours. Il a ensuite été découvert et ainsi exposé à l'évaporation jusqu'au 20 Octobre 1981.

Avant l'irrigation du 20 Octobre 1981, le sol était donc fortement desséché après trois mois d'évaporation.

Le profil tensiométrique initial était le suivant :

Profondeur (cm)	10	20	30	40	50	65	80	110	150
h (cm eau)	700	700	730	352	186	?	156	158	162

Le volume total de l'irrigation est de 25 l 760 réparti sur 45 heures 20 minutes, soit 568 cc/heure ou 0,289 cm/h.

Après un ressuyage de 7 jours, le monolithe a été irrigué avec 7 litres de l'eau n°1 pendant 28 heures 35 minutes (0,125 cm/h), puis a subi un ressuyage de 5 jours.

Le monolithe a été irrigué ensuite avec 5 l de solution n°2 pendant 23 heures 25 minutes (0,109 cm/h).

Les échantillons prélevés dans l'eau de drainage sont notés dans l'ordre chronologique de D1 à D37. Les résultats d'analyse sont portés dans le tableau 6.

II - Description de l'essai du 20 Janvier 1982

Cet essai a consisté à irriguer la monolithe uniquement avec l'eau de la Medjerdah.

Les débits étaient de l'ordre de 0,3 cm/h. Après 1H30 d'irrigation, le monolithe a été couvert pour subir une période de drainage interne.

Les eaux de drainage ont apparues 1H15 après le début de l'irrigation ; les échantillons d'eau ont été notés de E1 à E19 dans l'ordre chronologique. Les résultats d'analyse ont été portés dans le tableau 7.

	K mmole/P	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
D ₁	0,330	23,400	8,375	4,625	23,130	10,800	7,7
D ₂	0,270	23,400	8,325	5,125	24,770	11,450	7,5
D ₃	0,250	23,250	8,250	5,250	25,000	11,500	7,7
D ₄	0,300	23,100	7,875	4,125	20,900	10,750	7,8
D ₅	0,290	23,750	8,300	4,700	24,340	10,350	7,6
D ₆	0,320	23,400	7,850	3,550	19,920	11,400	7,8
D ₇	0,300	23,100	7,825	4,175	23,200	10,100	7,7
D ₈	0,270	23,750	8,250	5,250	23,320	11,850	7,5
D ₉	0,260	24,750	8,700	5,300	26,810	11,600	7,6
D ₁₀	0,260	25,000	8,950	5,050	25,060	11,600	7,6
D ₁₁	0,260	25,000	9,325	5,625	25,560	12,250	7,5
D ₁₂	0,260	25,000	9,325	5,675	26,760	12,250	7,5
D ₁₃	0,250	25,000	9,050	4,450	24,350	11,450	7,6
D ₁₄	0,250	25,000	8,950	6,050	27,350	11,450	7,6
D ₁₅	0,240	25,000	9,050	4,450	24,540	11,350	7,5
D ₁₆	0,200	24,250	9,400	4,600	19,250	13,600	7,7
D ₁₇	0,220	24,600	9,125	4,875	23,320	12,250	7,5
D ₁₈	0,230	24,100	8,550	5,450	24,630	11,350	7,6
D ₁₉	0,190	23,750	8,550	5,950	24,940	12,000	7,8
D ₂₀	0,200	23,750	8,550	5,950	23,750	12,100	7,5
D ₂₁	0,200	23,100	8,425	7,575	26,100	12,100	7,6
D ₂₂	0,200	23,400	8,425	6,615	25,900	11,350	7,9
D ₂₃	0,200	23,400	8,750	6,750	23,500	13,050	7,8
D ₂₄	0,200	23,400	8,425	6,575	25,200	11,700	7,7
D ₂₅	0,260	23,400	8,075	6,925	22,860	12,900	7,5
D ₂₆	0,210	19,100	8,750	6,750	20,310	12,500	7,6

	K mmole/P	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
D ₂₇	0,390	36,000	10,450	6,550	41,290	12,550	7,5
D ₂₈	0,580	47,000	11,950	8,050	51,830	15,875	7,5
D ₂₉	0,300	28,000	10,600	7,900	33,300	13,500	7,7
D ₃₀	0,270	26,000	10,000	7,000	32,070	12,100	8,0
D ₃₁	0,230	23,000	9,750	7,750	28,430	12,900	7,5
D ₃₂	0,230	23,000	9,750	6,850	27,030	12,100	7,7
D ₃₃	0,230	23,000	9,775	6,225	24,930	13,150	7,7
D ₃₄	0,200	22,000	9,750	7,250	26,500	12,500	7,7
D ₃₅	0,230	24,000	10,200	6,800	28,230	12,500	8,0
D ₃₆	0,230	23,000	10,600	6,900	29,030	12,100	8,0
D ₃₇	0,230	22,000	10,000	7,000	27,530	11,850	8,2

Tableau - 6 : Analyses chimiques des eaux de drainage.

	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
E ₁	0,51	60,00	15,575	10,425	65,01	21,250	7,3
E ₂	0,64	63,50	15,425	21,550	63,14	24,000	7,2
E ₃	0,67	61,50	29,650	19,350	68,67	18,750	7,3
E ₄	0,62	57,00	14,000	10,000	58,62	21,000	7,4
E ₅	0,49	48,00	13,175	9,825	45,76	21,875	7,4
E ₆	0,41	42,00	12,500	10,000	39,49	21,500	7,4
E ₇	0,35	38,50	12,075	7,925	45,75	14,000	7,5
E ₈	0,25	36,00	11,700	7,300	37,25	16,000	7,6
E ₉	0,30	34,50	11,500	8,500	39,30	15,250	7,6
E ₁₀	0,29	32,50	11,125	8,375	37,79	14,500	7,8
E ₁₁	0,28	32,50	10,450	8,550	33,03	16,375	8,0
E ₁₂	0,27	30,00	10,450	7,550	33,07	14,600	7,5
E ₁₃	0,27	31,00	10,450	7,550	33,67	14,300	7,7
E ₁₄	0,27	30,00	10,000	9,000	34,97	14,150	8,0
E ₁₅	0,27	31,00	10,450	7,550	33,17	14,550	7,7
E ₁₆	0,26	32,00	10,450	6,550	30,66	15,300	7,5
E ₁₇	0,25	29,50	10,450	6,550	29,75	14,500	8,1
E ₁₈	0,25	30,00	15,725	7,050	32,05	15,100	8,2
E ₁₉	0,25	31,00	10,450	6,550	33,45	13,400	8,0

Tableau - 7 : Analyses chimiques des eaux de drainage.

III - Description de l'essai du 29 Mars 1982

Cet essai avait pour but de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du sol en phase d'humectation. Il était nécessaire d'imposer des flux d'irrigation très faibles. Pendant les 5 premières heures l'intensité d'irrigation était de 0,1cm/h puis de 0,2cm/h pendant les 7 heures suivantes.

L'eau utilisée était celle de la Madjerdah.

Les échantillons d'eau de drainage ont été notés de F1 à F81. Les résultats d'analyse figurent dans le tableau 8.

IV - Conductivité et résidu sec

La mesure de la conductivité électrique à 25°C a été effectuée sur chaque échantillon.

Cette valeur est étroitement corrélée au résidu sec (g/l). Le coefficient de corrélation est cependant trop faible pour pouvoir estimer une valeur à partir de l'autre (voir figure 13).

- Echantillons D : 33 pts. $RS = 0,903 + 0,567.CE$ $r=0,95$
- Echantillons F : 81 pts $RS = 0,230 + 0,658.CE$ $r=0,94$
- Echantillons D+F: 114 pts $RS=0,982 + 0,541.CE$ $r=0,97$

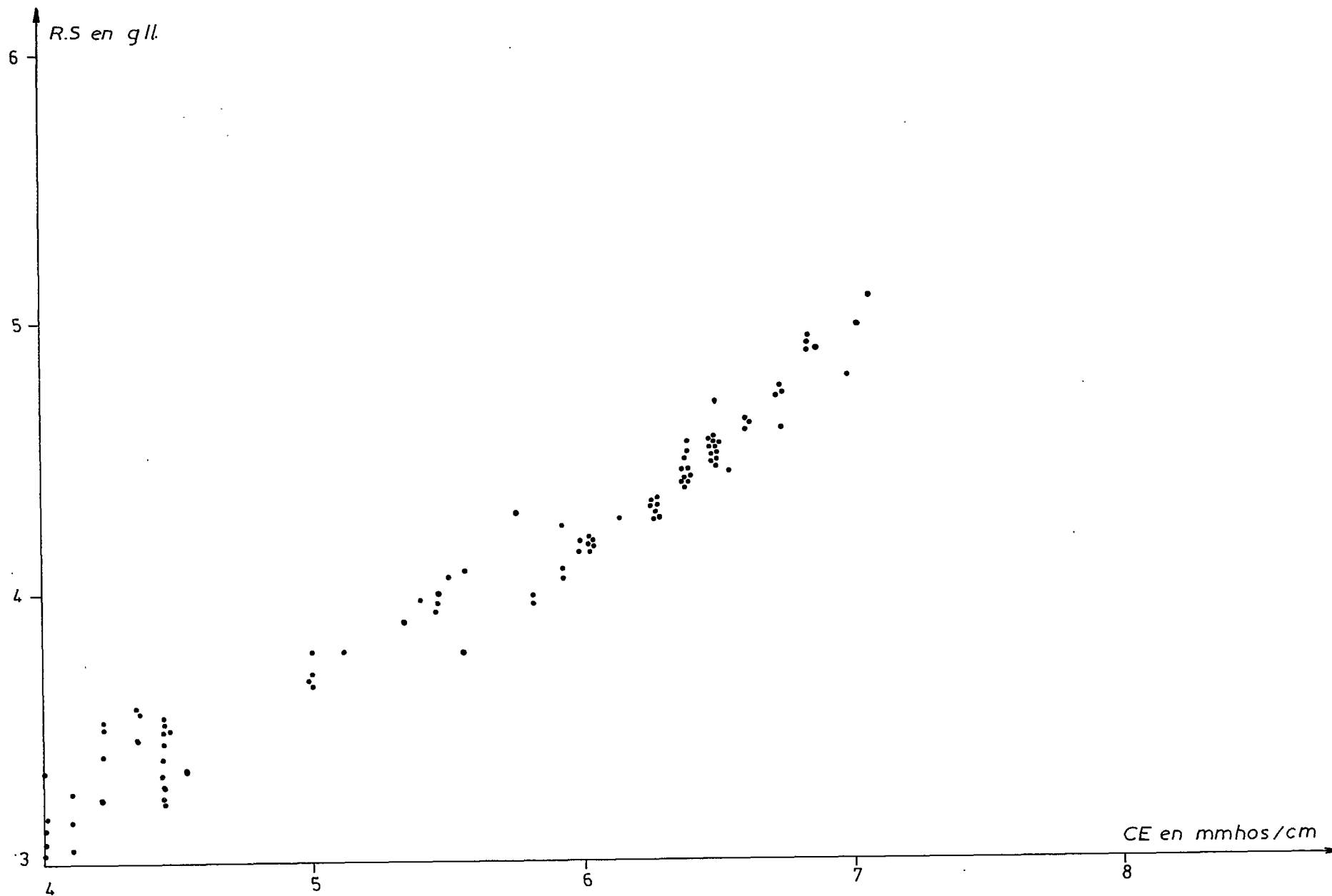


Fig.13 RELATION CONDUCTIVITE ELECTRIQUE _RESIDU SEC

	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
F ₁	0,21	16,60	4,500	4,000	18,31	5,775	7,2
F ₂	0,26	29,00	11,675	7,325	28,01	17,125	7,3
F ₃	0,26	29,00	11,000	8,000	29,24	17,000	7,3
F ₄	0,28	30,00	10,850	7,650	32,28	15,500	7,5
F ₅	0,26	29,00	10,850	8,150	31,26	16,000	7,3
F ₆	0,26	26,00	11,425	8,575	30,76	15,750	7,2
F ₇	0,26	29,00	10,800	7,700	30,76	15,750	7,3
F ₈	0,27	30,00	11,550	6,950	30,27	16,000	7,3
F ₉	0,29	32,00	11,550	7,950	37,79	14,750	7,3
F ₁₀	0,30	32,00	11,950	8,050	39,80	14,250	7,2
F ₁₁	0,32	33,50	12,350	7,650	40,32	14,750	7,2
F ₁₂	0,28	31,50	12,900	7,100	35,78	15,500	7,1
F ₁₃	0,28	32,50	12,500	7,500	37,28	15,250	7,1
F ₁₄	0,29	34,00	11,950	8,050	44,71	13,750	7,2
F ₁₅	0,29	33,00	11,950	7,550	40,79	13,750	7,3
F ₁₆	0,29	32,00	11,950	7,550	38,79	14,250	7,4
F ₁₇	0,28	32,00	12,750	7,750	40,72	14,000	7,5
F ₁₈	0,26	31,00	12,625	8,375	34,01	17,125	7,3
F ₁₉	0,30	30,00	12,500	9,500	43,80	13,250	7,2
F ₂₀	0,34	37,00	12,650	7,350	44,59	14,375	7,2
F ₂₁	0,32	35,00	13,300	7,700	43,57	14,375	7,0
F ₂₂	0,32	37,50	12,752	8,725	47,07	14,375	7,2
F ₂₃	0,33	37,50	13,000	7,000	42,83	15,000	7,2
F ₂₄	0,35	37,00	12,650	7,350	43,35	15,000	7,3
F ₂₅	0,33	37,00	12,350	7,650	42,63	15,000	7,3

	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
F ₂₆	0,32	37,50	13,000	8,000	42,32	16,250	7,3
F ₂₇	0,31	36,00	13,300	10,200	43,31	17,500	7,3
F ₂₈	0,30	36,00	13,175	6,825	41,30	15,000	7,3
F ₂₉	0,32	37,50	13,725	7,225	42,32	16,250	7,2
F ₃₀	0,33	39,00	13,175	8,825	46,32	16,500	7,2
F ₃₁	0,34	39,00	13,850	7,650	48,59	14,375	7,2
F ₃₂	0,30	36,00	13,850	7,150	43,80	14,750	7,1
F ₃₃	0,30	35,00	13,300	7,700	41,30	15,500	7,2
F ₃₄	0,30	35,00	13,300	8,200	42,30	15,500	7,2
F ₃₅	0,30	35,00	12,650	8,850	42,30	15,500	7,3
F ₃₆	0,30	34,50	13,450	6,550	41,05	14,375	7,5
F ₃₇	0,29	34,00	13,300	7,700	46,46	14,375	7,3
F ₃₈	0,30	36,00	13,050	8,950	45,30	15,500	7,2
F ₃₉	0,33	37,50	12,825	7,175	42,83	15,500	7,3
F ₄₀	0,32	37,50	12,825	7,175	45,07	14,375	7,2
F ₄₁	0,30	35,00	13,175	8,325	39,55	16,875	7,0
F ₄₂	0,30	36,00	12,350	8,650	44,30	15,000	7,1
F ₄₃	0,32	36,00	12,700	8,300	44,57	14,375	7,4
F ₄₄	0,34	36,00	11,550	7,450	40,34	15,100	7,2
F ₄₅	0,37	36,00	11,375	7,625	40,77	15,300	7,3
F ₄₆	0,33	36,00	12,625	8,875	45,83	14,250	7,2
F ₄₇	0,35	37,00	11,625	7,375	40,75	15,300	7,2
F ₄₈	0,36	37,00	11,750	7,250	40,36	14,000	7,2
F ₄₉	0,39	36,00	11,500	7,000	42,29	13,050	7,2
F ₅₀	0,37	36,00	11,125	6,875	42,77	12,300	7,2

	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
F ₅₁	0,32	34,00	12,500	7,500	41,82	13,750	7,1
F ₅₂	0,33	35,00	11,875	7,625	40,83	14,250	7,2
F ₅₃	0,33	36,00	12,000	7,000	41,83	13,750	7,3
F ₅₄	0,34	35,00	12,750	7,250	42,24	13,050	7,3
F ₅₅	0,37	35,00	11,375	8,125	42,87	13,250	7,3
F ₅₆	0,41	35,00	10,125	6,875	38,71	12,800	7,4
F ₅₇	0,35	36,00	11,950	8,550	41,60	15,875	7,3
F ₅₈	0,37	36,00	11,125	7,375	38,67	15,350	7,3
F ₅₉	0,37	34,50	10,700	6,300	39,73	12,550	7,3
F ₆₀	0,40	32,00	10,375	6,625	37,30	12,550	7,3
F ₆₁	0,40	35,00	10,300	8,500	45,40	11,500	7,3
F ₆₂	0,30	32,50	12,375	8,125	41,30	13,750	7,1
F ₆₃	0,32	36,00	10,750	7,750	43,82	12,250	7,3
F ₆₄	0,34	35,00	10,900	7,600	42,34	12,500	7,3
F ₆₅	0,36	32,00	10,000	8,000	40,36	11,500	7,2
F ₆₆	0,37	32,00	10,150	8,350	41,37	11,500	7,2
F ₆₇	0,40	34,00	10,000	6,000	40,40	10,500	7,4
F ₆₈	0,32	34,00	11,700	8,300	41,32	14,000	7,4
F ₆₉	0,34	33,00	11,250	7,750	41,34	12,500	7,3
F ₇₀	0,36	34,50	10,650	7,850	40,86	13,000	7,4
F ₇₁	0,38	32,50	9,650	8,350	39,88	12,000	7,4
F ₇₂	0,37	34,00	10,300	7,700	40,37	12,500	7,3
F ₇₃	0,32	34,00	11,750	9,750	42,82	14,750	7,0
F ₇₄	0,31	36,00	11,550	8,950	43,06	14,625	7,1
F ₇₅	0,31	36,00	11,500	7,500	42,31	13,500	7,3

	K	Na	Ca	Mg	Cl	SO ₄	pH
F ₇₆	0,31	36,00	11,500	7,500	44,31	12,500	7,4
F ₇₇	0,31	36,00	10,500	8,500	43,31	13,500	7,5
F ₇₈	0,31	36,00	11,500	7,500	44,31	12,500	7,3
F ₇₉	0,31	35,50	11,500	8,000	44,81	12,500	7,5
F ₈₀	0,30	36,00	11,550	7,950	43,05	13,625	7,6
F ₈₁	0,30	36,00	11,550	7,950	43,30	13,500	7,1
F ₈₂	0,30	36,00	12,000	7,000	41,30	14,000	7,2

Tableau - 8 : Analyses chimiques des eaux de drainage.

CHAPITRE III

Méthode de calcul géochimique

I - Rappel des notions d'activité, molalité, saturation.

Les résultats des analyses chimiques utilisés pour les calculs sont exprimés en molarité c'est-à-dire en nombre de mole de l'élément i par litre de solution. Cependant, lorsque la concentration des éléments autres que i est élevée, tout ce passe comme si la concentration de l'élément i était inférieure à la quantité mesurée. L'activité, c'est-à-dire la concentration efficace se calcule à partir de la molalité (nombre de mole par kilogramme d'eau) de l'élément considéré.

$$\text{activité } i = \text{molalité } i \times \text{coefficient d'activité } i$$

ou

$$a_i = m_i \times \gamma_i$$

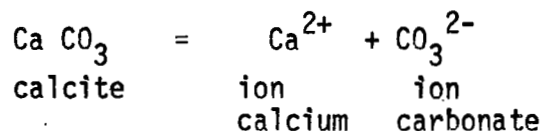
Dans le domaine de concentration qui nous concerne, on peut confondre molarité et molalité. Le problème est de calculer le coefficient d'activité i .

Dans la gamme des concentrations considérées, la loi de Debye Hückel est assez précise, et donc choisie pour ces calculs.

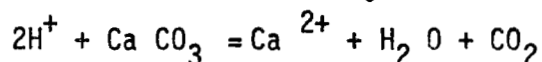
Connaissant l'activité des différents ions en solution, on peut calculer dans quel sens va évoluer cette solution au contact de minéraux.

Considérons l'exemple de la calcite : l'équation de dissolution / précipitation

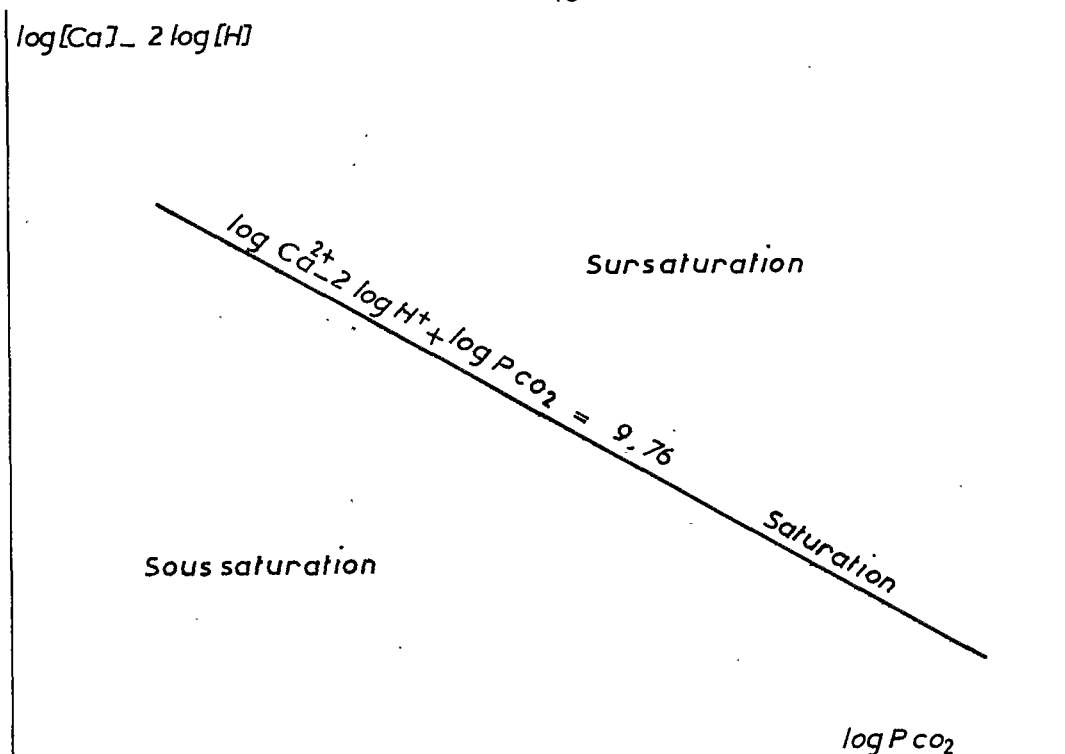
s'écrit :



Lorsque le produit ionique ($Q = a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}}$) est inférieur au produit de solubilité K du minéral, la solution est sous saturée et le minéral va se dissoudre. Lorsque $Q > K$, la solution est sursaturée et le minéral va précipiter. L'état d'équilibre est obtenu quand $Q = K$ c'est-à-dire quand $a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}} = K_{\text{calcite}}$. La solution est juste à saturation par rapport à la calcite. Dans un diagramme $\log \text{Ca}^{2+}$, $\log \text{CO}_3^{2-}$ les points en équilibre seront sur la droite $\log \text{Ca}^{2+} + \log \text{CO}_3^{2-} = \log K_{\text{calcite}}$. Les points situés en dessous de cette droite sont sous saturés et ceux situés au dessus sont sursaturés. Dans le cas de la calcite il peut être avantageux de considérer l'ion CO_3^{2-} comme la dissociation du CO_2 dissout :



On représente alors les points dans le diagramme $\log \text{Ca}^{2+} - 2 \log \text{H}^+$, $\log \text{PCO}_2$.



- Figure 14. Diagramme d'équilibre de la calcite.

II - Rappel sur les concepts d'alcalinité, alcalinité résiduelle, règle du 1

L'alcalinité d'une eau est définie comme la quantité d'ions H^+ qu'il faut ajouter pour que toute diminution de pH corresponde exactement à chaque apport d'ion H^+ . Cette quantité correspond à la somme de tous les anions d'acides faibles susceptibles de réagir avec l'ion H^+ , ce sont les ions tels que HCO_3^- , CO_3^{2-} , $H_3SiO_4^-$, etc..

$$\text{Alcalinité} = \Sigma HCO_3^- + 2 \Sigma CO_3^{2-} + HSiO_4^-$$

ΣHCO_3^- correspond à HCO_3^- et aux espèces telles que $CaHCO_3$, $NaHCO_3$, etc.. En général l'alcalinité représente surtout la quantité $HCO_3^- + 2CO_3^{2-}$.

Lorsque l'on compare l'expression de l'alcalinité avec l'équation de neutralité électrique de la solution, il vient :

$$\text{Alc} = Na + K + 2Mg - Cl - 2SO_4 - NO_3$$

avec Na, K, ... exprimés en mole/litre et donnés directement par analyse.

L'alcalinité résiduelle est définie par :

$$\text{Alc}_{\text{resi}} = \text{Alc} - 2Ca - 2Mg \quad (\text{DROUBI} - 1976)$$

Considérons l'évolution d'une eau par évaporation ; lorsqu'elle dépasse le produit de solubilité de la calcite et de la magnésite, les deux minéraux précipitent.

Chaque ion Ca^{2+} ou Mg^{2+} s'associe à un ion CO_3^{2-} . Si les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} sont plus abondants que les ions CO_3^{2-} , ces derniers vont diminuer en concentration.

Ca et Mg vont augmenter pour respecter le produit de solubilité des deux minéraux. L'alcalinité résiduelle est négative au départ ($2Ca + 2Mg > Alc$) et le reste par la suite.

Dans le cas contraire, l'alcalinité résiduelle est positive, Ca^{2+} et Mg^{2+} diminuent, et CO_3^{2-} augmente, dès que le produit de solubilité de la calcite est atteint. (Fig.15)

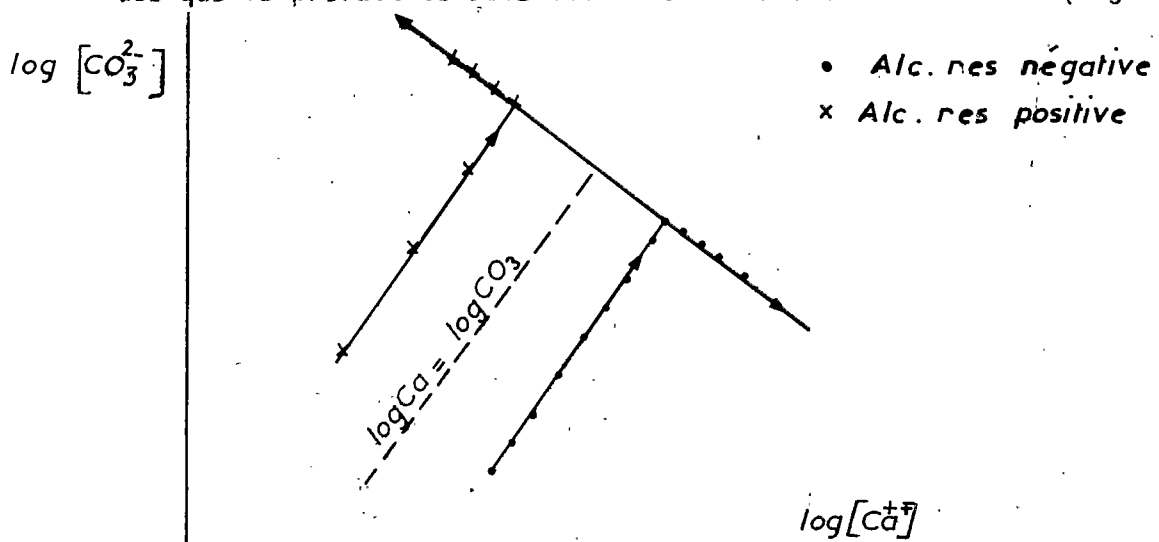


Figure 15 : Evolution de la composition chimique de la solution suivant le signe de l'alcalinité résiduelle.

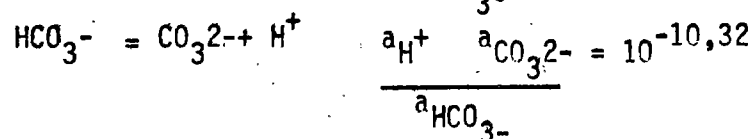
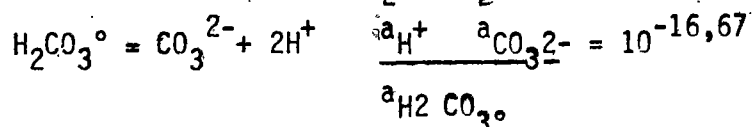
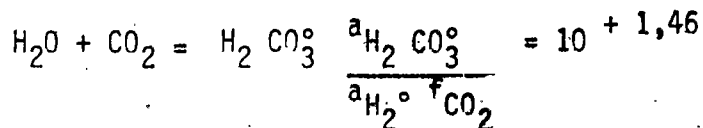
On remarque que dans le diagramme $\log Ca^{2+}$, $\log CO_3^{2-}$ l'évolution de la solution se fait suivant une branche ou l'autre d'un T.

Cette notion peut être étendue aux autres sels ou à un ensemble de sels (DROUBI et al - 1980).

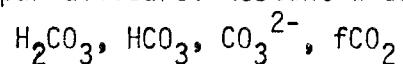
III - Relations pH , pCO_2 , CO_3 , HCO_3

Dans une solution, le CO_2 se trouve sous diverses formes : H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , ...

Pour connaître les diverses formes du CO_2 en solution il est nécessaire de connaître les constantes thermodynamiques des réactions :



Les résultats d'analyse fournissent le $\text{pH} = -\log a_{\text{H}^+}$, et l'alcalinité. L'activité de l'eau, toujours voisine de 1, est calculée par ailleurs. Restent à déterminer :



à l'aide des trois équations et de $\text{Alc} = \text{HCO}_3^- + 2 \text{CO}_3^{2-}$. Le système de quatre équations à quatre inconnues peut être résolu.

On peut déterminer alors $f \text{CO}_2$ en équilibre avec la solution, ce qui permet de connaître la pression partielle en CO_2 régnant dans le sol. Cependant, la mesure du pH et de l'alcalinité doivent être effectuées sitôt après la sortie des solutions du monolithe.

CHAPITRE IV

Caractérisation chimique des solutions - considérations sur la porosité

I - Prévision de l'évolution chimique de l'eau d'irrigation dans le monolithe.

La composition chimique de l'eau d'irrigation (Medjerdah) a été donnée dans le premier chapitre. D'autre part l'alcalinité a été définie (chapitre III).

$$\text{Alc} = \text{Na} + \text{K} + 2 \text{Ca} + 2 \text{Mg} - \text{Cl} - 2\text{SO}_4$$

$$\text{Alc} = 0,22 + 23,40 + 2(5,7+2,3) - 20,72 - 2 \times 7,45 = 4 \text{ mmole/l}$$

et $\text{Alc résiduelle} - (\text{calcite} + \text{magnésite}) = \text{Alc} - 2 \text{Ca} - 2 \text{Mg}$

$$\text{Alc résiduelle} - (\text{calcite} + \text{magnésite}) = 4 - 2(5,7+2,3) = -12 \text{ mmole/l.}$$

L'alcalinité résiduelle calcite + magnésite est négative. En ce concentrant dans le sol, l'eau d'irrigation va atteindre tout d'abord le produit de solubilité de la calcite et de la magnésite, sels peu solubles. Comme la quantité $2(\text{Ca} + \text{Mg})$ est plus importante que l'alcalinité, lors de la concentration des solutions dans le sol, les molarité de Ca et de Mg vont croître, par contre la molarité en HCO_3 va décroître. C'est ce que traduit le signe de l'alcalinité résiduelle (calcite + magnésite).

La molarité en calcium augmentant plus rapidement que celle des autres ions, la solution du sol va atteindre vraisemblablement le produit de solubilité du gypse.

Nous pouvons calculer l'alcalinité résiduelle (calcite + magnésite + gypse) =

$$\begin{aligned} \text{Alc résiduelle} (\text{calcite} + \text{magnésite} + \text{gypse}) &= \text{Alc} - 2 \text{Ca} - 2 \text{Mg} + 2\text{SO}_4 \\ &= \text{Alc résiduelle calcite} \\ &\quad + \text{magnésite} + 2 \text{SO}_4 \end{aligned}$$

$$\text{Alc résid. calc. magn. gypse} = 12 + 2(7,45) = + 2,9$$

L'alcalinité résiduelle (calcite + magnésite + gypse) est positive, ce qui signifie que l'ion sulfate est plus abondant que les ions calcium non impliqués dans la précipitation de la calcite. Lorsque la solution du sol aura atteint le produit de solubilité du gypse, la molarité en calcium va décroître et la molarité en sulfate va croître plus rapidement que celle des autres ions (Cl par exemple); la molarité de CO_3 augmente. La molarité du sodium augmente proportionnellement au facteur de concentration de la solution et celle du sulfate augmente encore plus vite. La solution du sol devrait donc atteindre la saturation par rapport à la mirabilité. Nous pouvons alors calculer l'alcalinité résiduelle (calcite + magnésite + gypse + mirabilité) :

$$\text{Alc résid. calc+magn+gypse+mirabilité} = \text{Alc} - 2\text{Ca} - 2\text{Mg} + 2\text{SO}_4 - \text{Na}$$

$$\text{Alc résid. calc+magn+gypse-Na}$$

$$\text{Alc résid. calc+magn+gypse+mirab} = + 2,9 - 23,40 = - 20,5$$

Cette alcalinité résiduelle est négative. Par concentration de la solution du sol, la molarité en sodium va augmenter, celle du sulfate diminuer, celle du calcium augmenter, celle de HCO_3 diminuer à nouveau.

Il faut remarquer cependant que dans ce raisonnement, on suppose connue la série de précipitations. Si la précipitation de la calcite puis du gypse paraissent évidentes, il n'est pas sûr que la précipitation de la mirabilité intervienne avant celle d'un autre sel.

De plus elle n'interviendrait qu'à des facteurs de concentration élevés, c'est-à-dire lorsque le sol est très sec.

On peut résumer les informations fournies par le calcul des alcalinités résiduelles sur la figure 16.

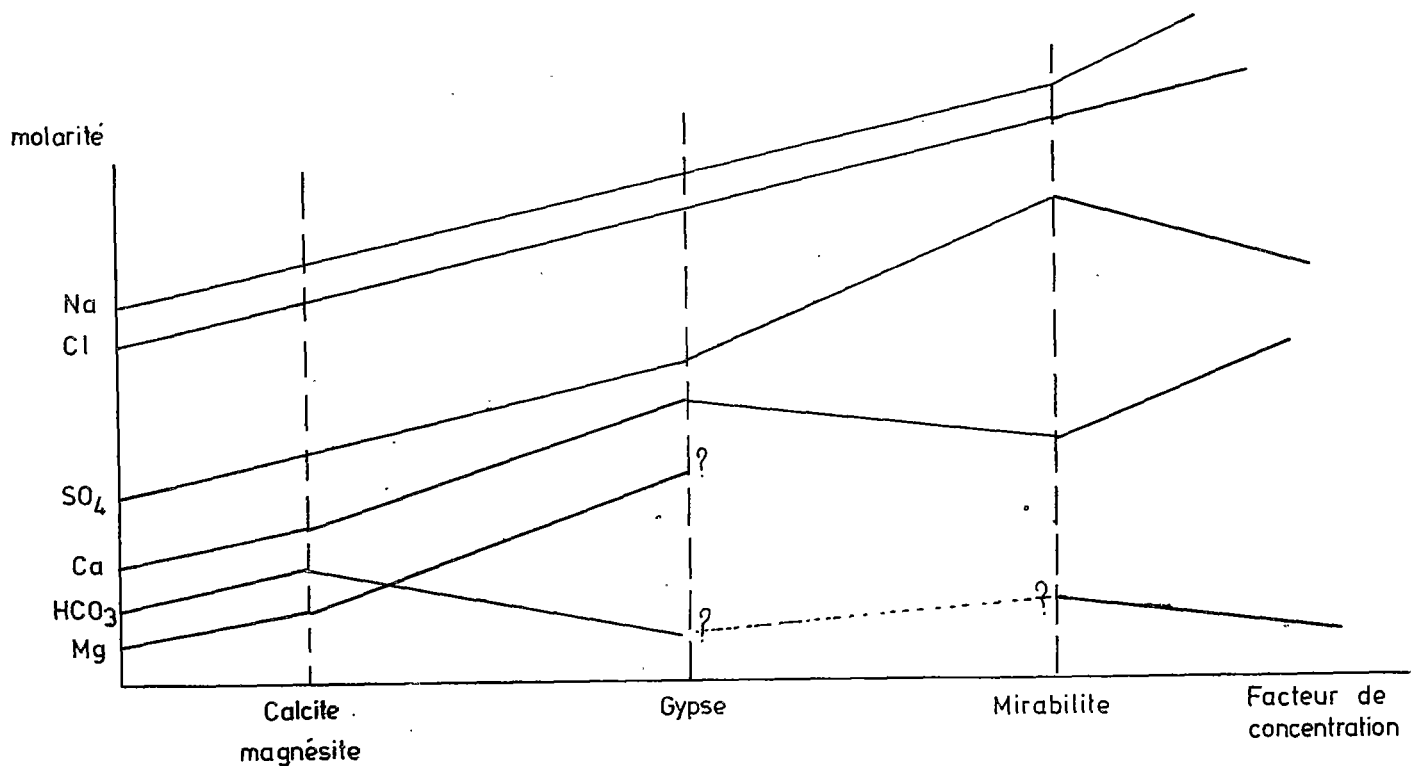


Figure 16 : Sens de l'évolution de la composition chimique de l'eau de la Medjerdah estimé à partir du calcul de l'alcalinité résiduelle.

II - Etat de saturation des solutions par rapport à la calcite et à la magnésite.

L'irrigation du 20-10-81 (échantillons série D)

Le monolithe est irrigué avec l'eau de la Medjerdah. Les eaux de drainage sont numérotées dans l'ordre chronologique. Les analyses ont été effectuées plusieurs semaines après le prélèvement des échantillons. Les résultats d'analyse sont traités par un programme de calcul des activités utilisant la loi de Debye Hückel.

Si l'on porte les points obtenus dans le diagramme $\log a_{Ca^{2+}} + 2pH$, $\log fCO_2$, on remarque que les eaux sont sursaturées par rapport à la calcite.

Le nuage des points est assez circulaire, et ne s'étire pas selon la droite $\log a_{Ca^{2+}} + 2pH = \log fCO_2 = 10+9,76$ comme le laisserait supposer le calcul géochimique (figure 17).

Dans le diagramme $\log a_{Mg} + 2pH$, $\log fCO_2$, le nuage de points se situe de part et d'autre de la droite d'équilibre de la magnésite. Les solutions sont donc à saturation par rapport à ce minéral. Comme pour la calcite, le nuage de point est circulaire (figure 18).

Irrigation du 20-01-82 (échantillons série E)

Le monolithe est irrigué avec de l'eau de la Medjerdah. La seule différence notable avec le 20 Octobre 1981 est que dans ce cas, on mesure le pH aussitôt à la sortie du monolithe. La mesure ne prend que quelques minutes.

Lorsque l'on porte les points dans le diagramme de saturation de la calcite, on observe que le nuage est situé nettement au dessus de la droite d'équilibre avec la calcite. Les solutions sont donc nettement sursaturées par rapport à ce minéral (fig.19).

On remarque d'autre part que le nuage de points est très aplati. Il s'étire selon une droite qui n'est pas tout à fait parallèle à la droite d'équilibre théorique mais qui semble la rejoindre dans la gamme des pCO_2 élevées ($10^{-1,5}$ environ).

Le phénomène peut s'observer dans la littérature (DOSSO-1980, DROUBI - 1976), dans le cas des solutions des sols irrigués par les eaux de l'Euphrate ou du Chari.

Dans le diagramme de saturation de la magnésite (Fig.20) on observe le même alignement des points selon une droite sécante à la droite théorique. Les solutions en équilibre avec un pCO_2 élevé sont à saturation par rapport à la magnésite. Les solutions sont sursaturées pour les pCO_2 plus faibles. Comme pour la calcite, le nuage de points est très aplati.

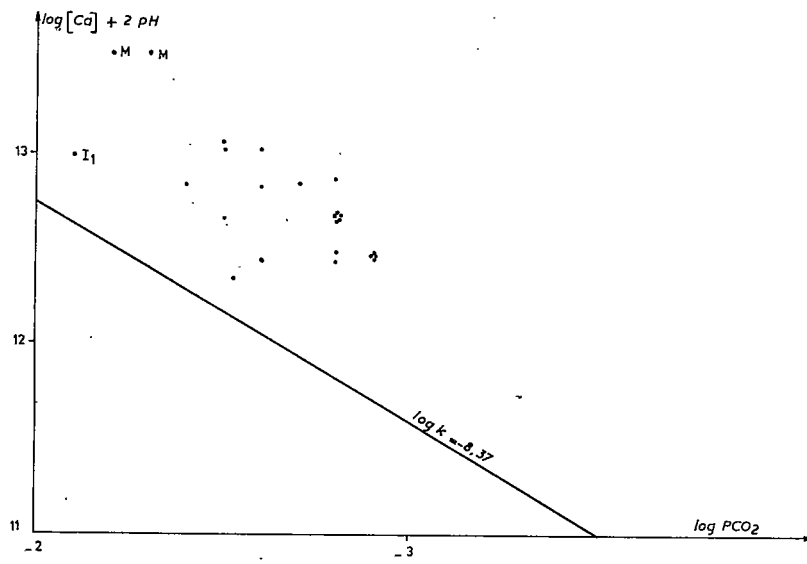


Fig.17_ DIAGRAMME DE SATURATION DE LA CALCITE _ ECHANTILLONS D_

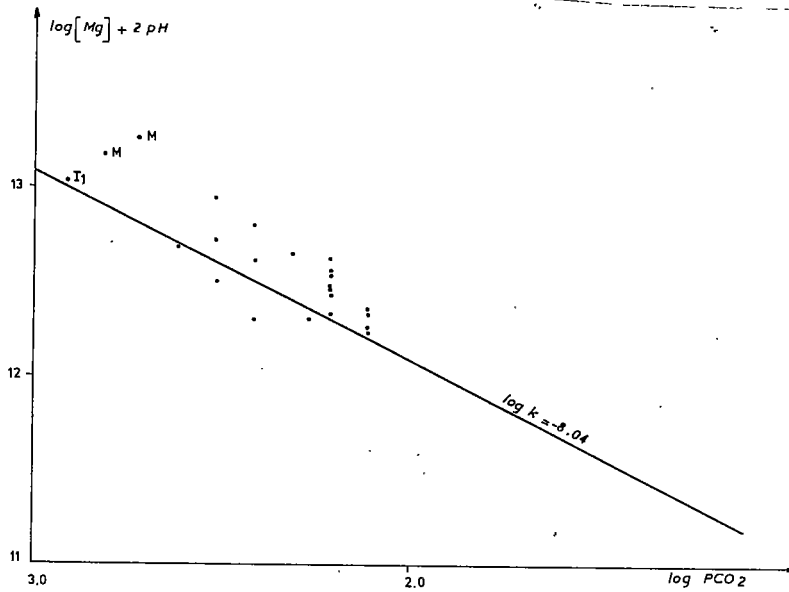


Fig.18_ DIAGRAMME DE SATURATION DE LA MAGNESITE _ ECHANTILLONS D

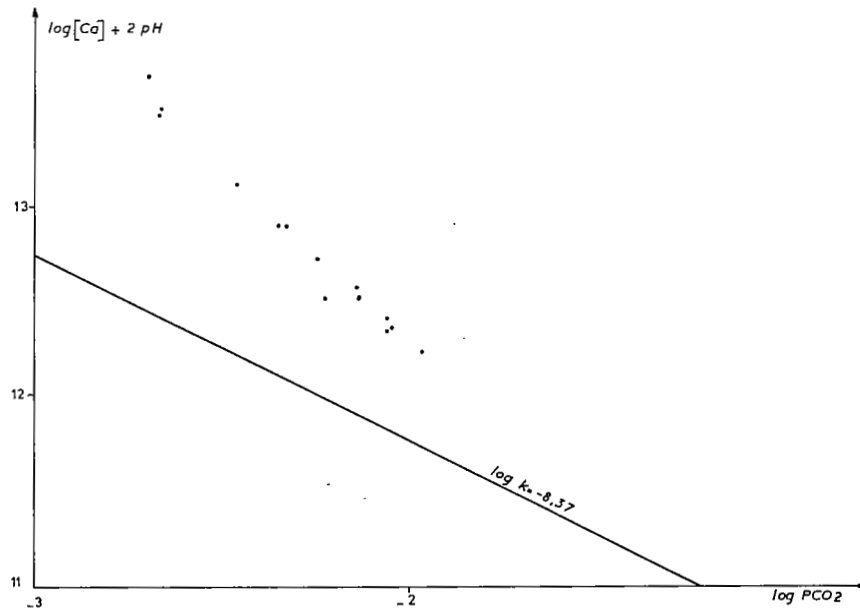


Fig. 19 - DIAGRAMME DE SATURATION DE LA CALCITE - ECHANTILLONS E₁-E₁₉

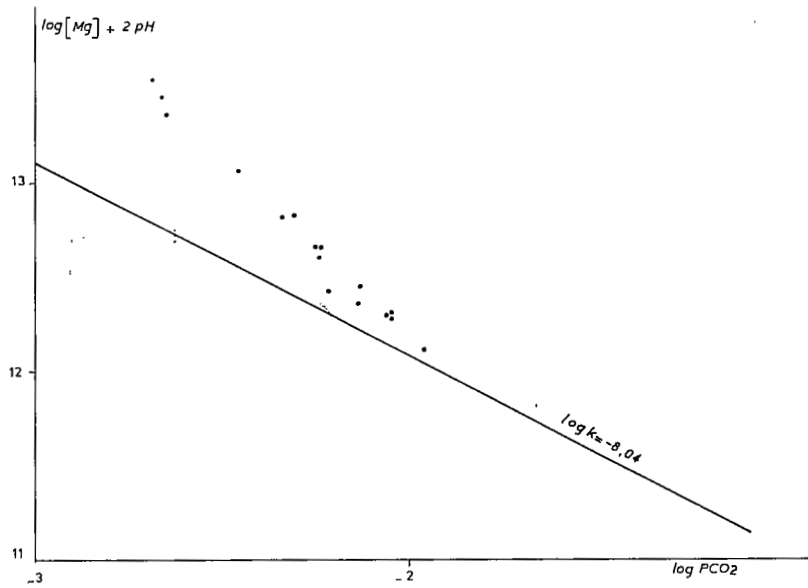


Fig. 20 - DIAGRAMME DE SATURATION DE LA MAGNESITE - ECHANTILLONS E₁- E₁₉

Irrigation du 29 Mars 1982 (Echantillons série F)

La conduite de l'irrigation est en tous points comparable à celle du 20 Janvier 1982. Seule l'intensité d'irrigation est modifiée. Le nombre de prélèvement est élevé (81 échantillons). Le pH est mesuré le plus rapidement possible après l'écoulement des solutions hors du monolithe.

Dans les diagrammes de saturation de la calcite (fig.21) et de la magnésite (fig.22), les points s'alignent selon deux droites sécantes par rapport aux droites théoriques. On remarque qu'ils sont situés dans le prolongement des points de la série E, selon les mêmes droites. Les nuages de points des séries E et F ont d'ailleurs une zone de recoupement pour les pCO_2 comprises entre $10^{-2,0}$ et $10^{-2,3}$. (fig. 23 et fig. 24).

De la comparaison des irrigations du 20 Octobre 1981 avec celles du 20 Janvier 1982 et du 29 Mars 1982, il ressort que :

- la rapidité de la mesure du pH est très importante pour le calcul de la solubilité de la calcite et de la magnésite.
- la sursaturation des eaux par rapport à la calcite s'estompe lorsque l'on prend le soin de mesurer le pH dès l'obtention des échantillons.
- la sursaturation est d'autant plus importante que l'eau est en équilibre avec un pCO_2 faible.

On peut donc supposer que la mesure de l'alcalinité au même moment que celle du pH devrait améliorer considérablement la précision de la mesure de la solubilité de la calcite et de la magnésite.

La sursaturation des échantillons observée pour les faibles pCO_2 pourrait s'expliquer de différentes manières ; on peut penser que les eaux en équilibre avec la calcite à la base du profil et qui ont un pCO_2 élevé (de l'ordre de $10^{-1,5}$ à $10^{-1,8}$), se dégazent au contact de l'atmosphère du lit de gravier. Les solutions se trouvent alors sursaturées à cause de la cinétique de précipitation. La sursaturation serait alors d'autant plus élevée que le dégazage est important ce qui conduit à des pCO_2 faible.

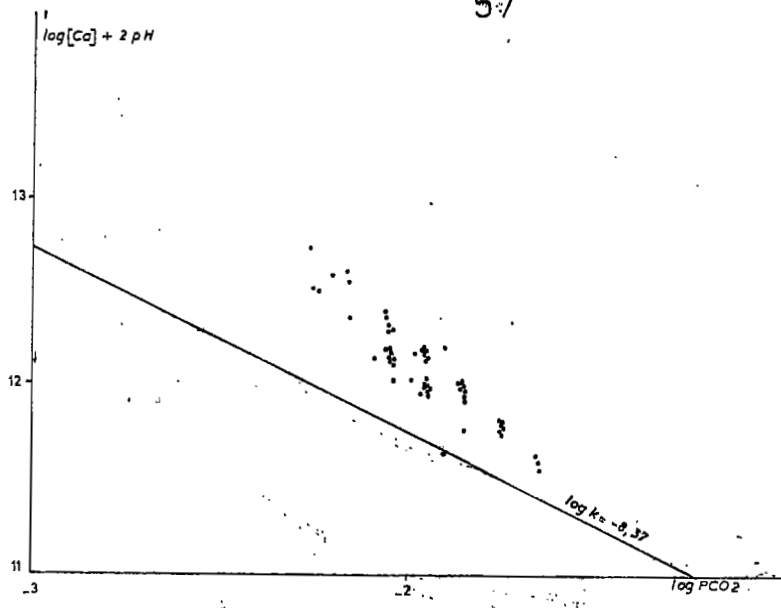


Fig. 21 - DIAGRAMME DE SATURATION DE LA CALCITE - ECHANTILLONS F₁ - F₈₁

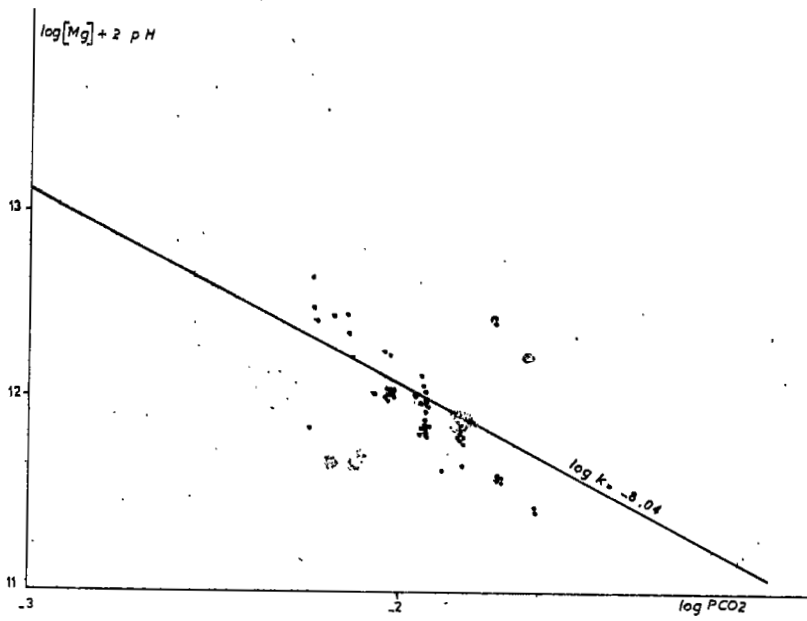


Fig. 22 - DIAGRAMME DE SATURATION DE LA MAGNESITE - ECHANTILLONS F₁ - F₈₁

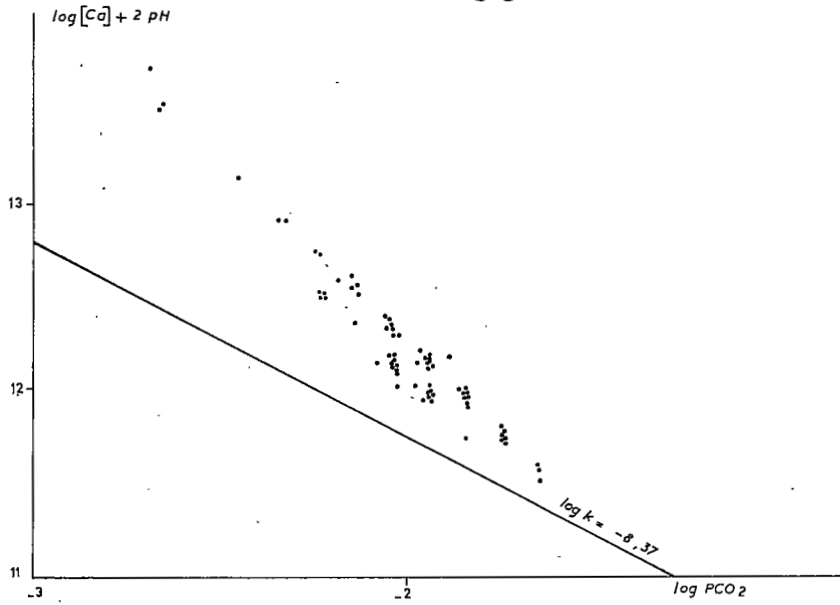


Fig.23.DIAGRAMME DE SATURATION DE LA CALCITE - ECHANTILLONS E_F

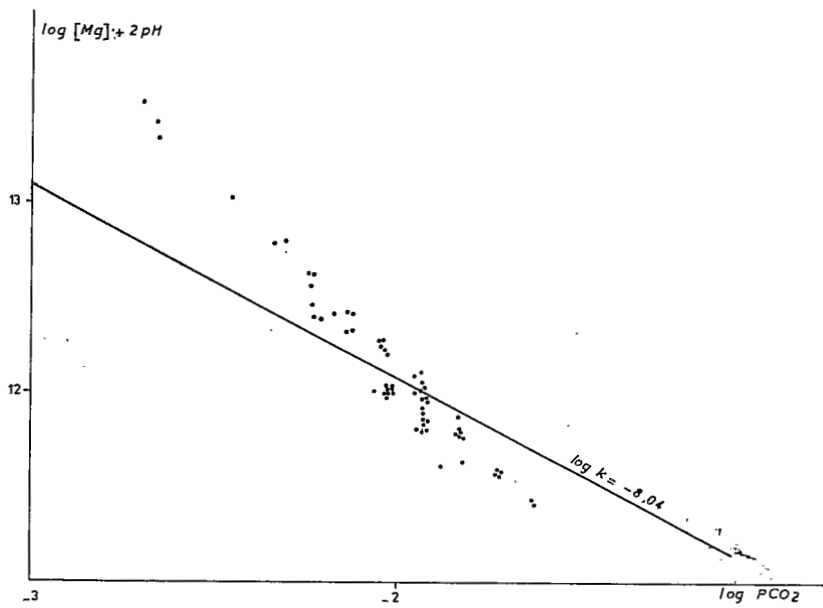


Fig.24-DIAGRAMME DE SATURATION DE LA MAGNESITE ECHANTILLONS E_F

On note enfin que les produits de solubilité de la calcite et de la magnésite présentés dans le monolithe sont comparables à ceux trouvés dans la littérature.(FRITZ - 1975). Ce sont donc des calcites bien cristallisés, stables.

III - Evolution de pCO₂ dans le sol soumis à l'irrigation

A partir de la mesure du pH et du calcul de l'alcalinité il est possible de calculer la pression partielle en CO₂ en équilibre avec la solution (§3 chapitre III).

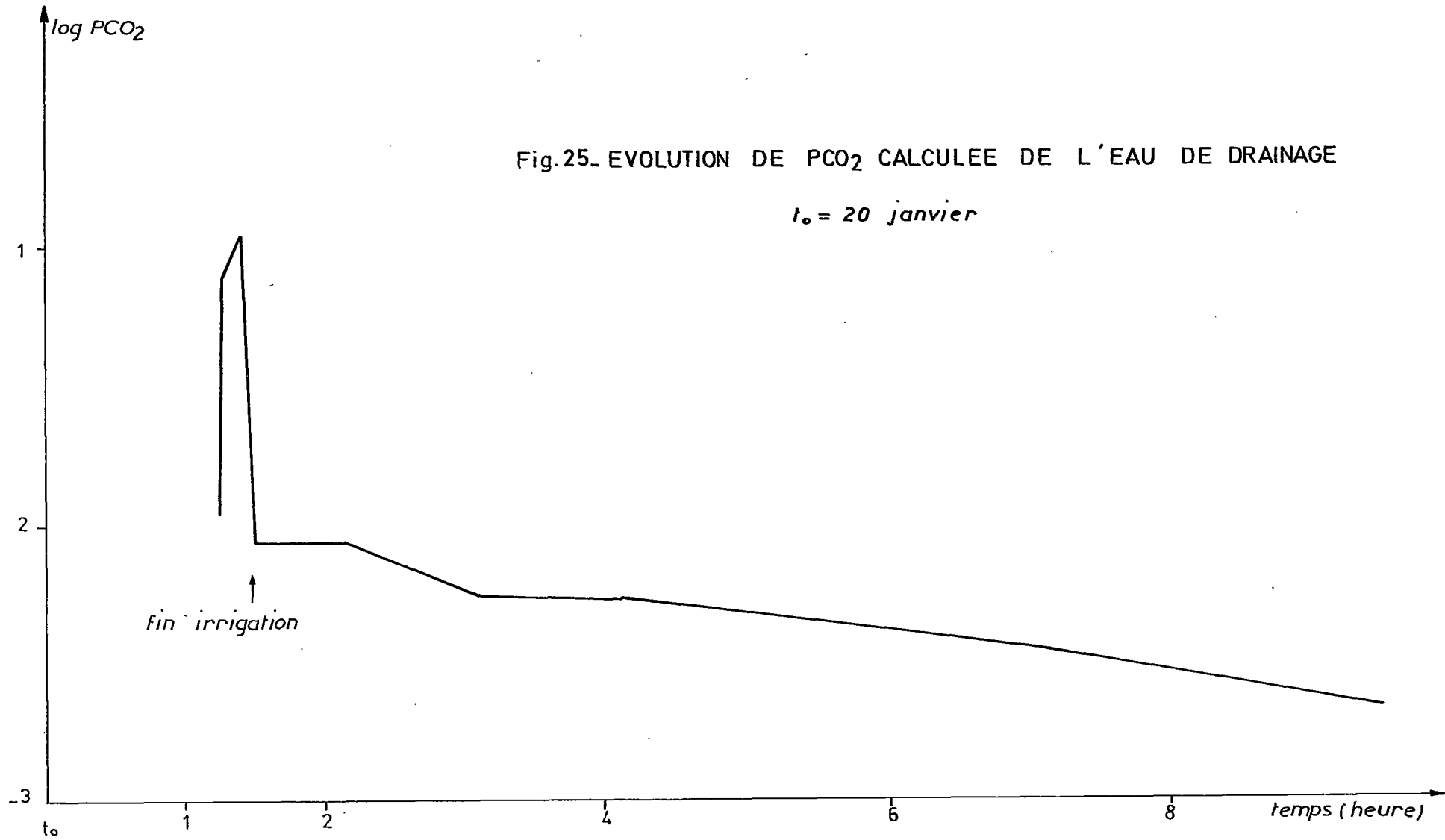
Le 20 Janvier 1982, le monolithe a été irrigué durant 1H30 puis couvert. Les eaux de drainages ont commencé à s'écouler à la base du monolithe 1H15 après le début de l'irrigation. Il a été possible de calculer le pCO₂ des eaux de drainage recueillies durant la journée du 20 Janvier. Au delà de cette date, les solutions ont stagné au niveau du lit de gravier, ce qui a retardé la mesure du pH et diminué la précision du calcul de pCO₂.

Pendant les dix premières minutes, les eaux de drainages ont une pression partielle en CO₂ élevée, de l'ordre de 10⁻¹. Cette pCO₂ est courante dans les sols, à des profondeurs supérieures à 30 cm. Les eaux de drainage ont ensuite un pCO₂ faible et décroissant de 10^{-2,1} à 10^{-2,7} (fig.25). Au delà de la première journée, la pCO₂ s'élève jusqu'à 10⁻² puis oscille.

Au début du drainage, l'eau a traversé le monolithe en se mélangeant avec la solution du sol. La valeur de 10⁻¹ reflète la pression partielle en CO₂ régnant dans le sol avant l'irrigation. Par la suite, la solution du sol est de plus en plus diluée par l'eau d'irrigation, les eaux de drainage tendent de plus en plus vers les caractéristiques de l'eau d'irrigation (faible pCO₂). Au delà du 20 Janvier, les eaux s'écoulaient lentement, séjournent dans le sol et se chargent en CO₂.

Fig.25- EVOLUTION DE PCO₂ CALCULEE DE L'EAU DE DRAINAGE

t₀ = 20 janvier



IV - Etat de saturation des solutions par rapport au gypse

L'irrigation du 20 Octobre 1981 (échantillons série D)

Le calcul de l'état de saturation de ces solutions par rapport à la calcite et à la magnésite a montré que le calcul de l'activité des ions a été faussé par la mesure tardive du pH.

Dans le diagramme de saturation par rapport au gypse, les points forment un nuage allongé selon une droite grossièrement parallèle à la saturation théorique ($\log Ca^{++} \log SO_4^{2-} + 2 \log H_2O = 4,85$). Les solutions sont cependant sous-saturées (fig.26).

L'eau d'irrigation (points M) est très sous-saturée rapport au gypse. Elle se situe au dessus de la droite $\log Ca = \log SO_4$. Si on trace une parallèle à cette droite passant par les points représentant l'eau d'irrigation, on traverse le nuage des points des eaux de drainage en son milieu.

Irrigation du 20 Janvier 1982 (échantillons série E)

Les points de cette série forment un nuage circulaire de part et d'autre de la droite de saturation théorique (fig.27).

Les eaux de drainage sont donc à saturation par rapport au gypse, ce qui indique la présence probable de ce minéral dans le monolithe.

Irrigation du 29 Mars 1982 (série F)

Les points de cette série se répartissent en deux groupes. Le premier allongé se situe de part et d'autre d'un axe perpendiculaire à la droite théorique de saturation. Le second s'étire selon la droite de saturation. On retrouve la loi du T prévue par le calcul de l'alcalinité résiduelle calcite + magnésite + gypse. La branche du T observée est celle du $SO_4 > Ca$ (Alc résiduelle calc + magn + gypse > 0). (fig.28).

L'évolution du produit ionique $\log Q = \log a Ca^{2+} + \log a SO_4^{2-} + 2 \log a H_2O$ avec l'ordre de sortie du monolithe laisse apparaître deux phases. La première comprenant les échantillons F1 à F44 sont voisins de la saturation avec le gypse : $|\log Q - \log K_{25^\circ C}| < 0,05$. De F45 à F80 le produit ionique s'écarte du produit de solubilité : $|\log Q - \log K| > 0,05$; les solutions sont sous-saturées par rapport au gypse. (fig.29).

Les variations sont plus nettes dans le diagramme $\log a Ca^{2+}$, $\log a SO_4^{2-}$.

- de F1 à F8 : F1 (M) représente la Medjerdah. Le point se situe dans la partie $SO_4 > Ca$. Si on trace la parallèle à $\log Ca = \log SO_4$ passant par F1, on remarque que les points F2 à F8 se situent à gauche de cette droite, et au voisinage de la droite de saturation.(fig.30).

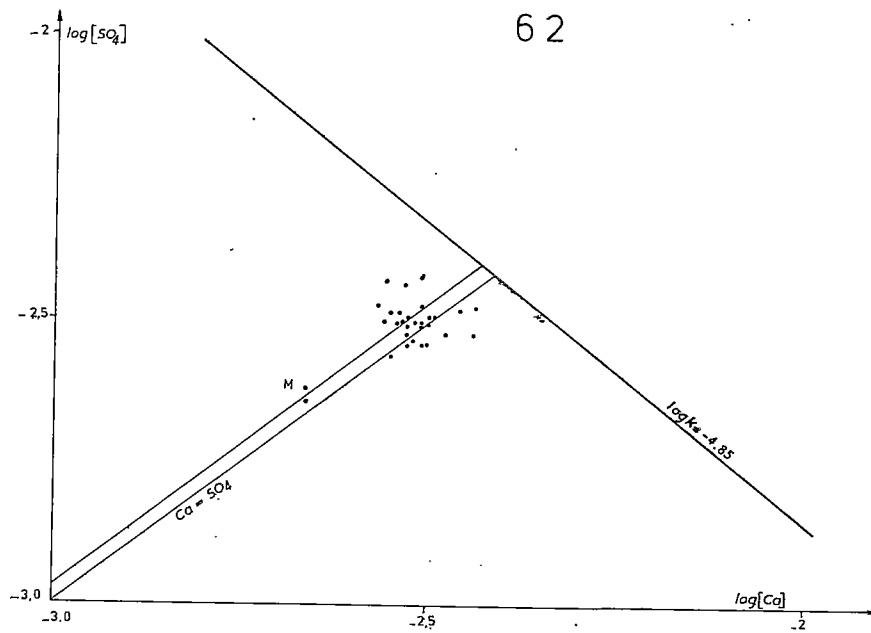


Fig.26-DIAGRAMME DE SATURATION DU GYPSE - ECHANTILLONS D

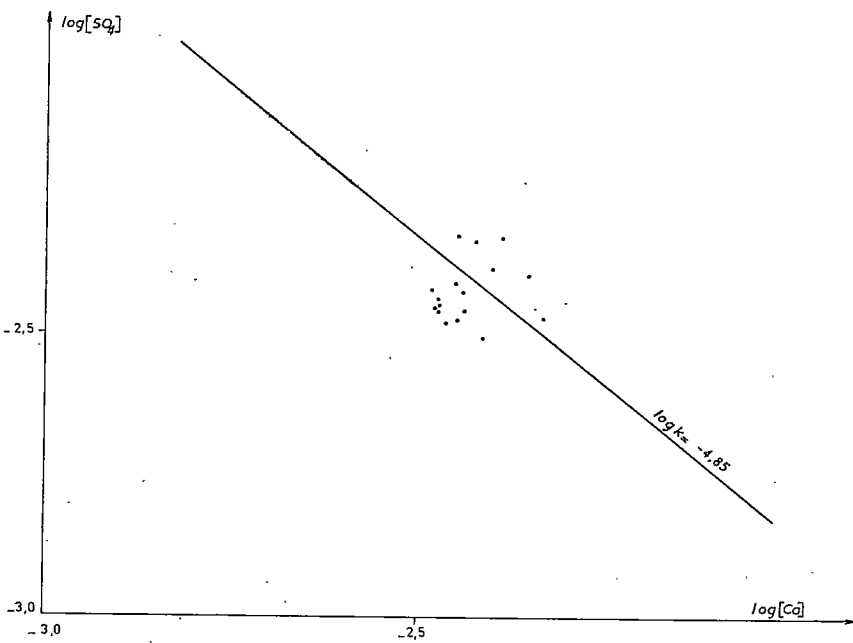


Fig.27- DIAGRAMME DE SATURATION DU GYPSE - ECHANTILLONS - E

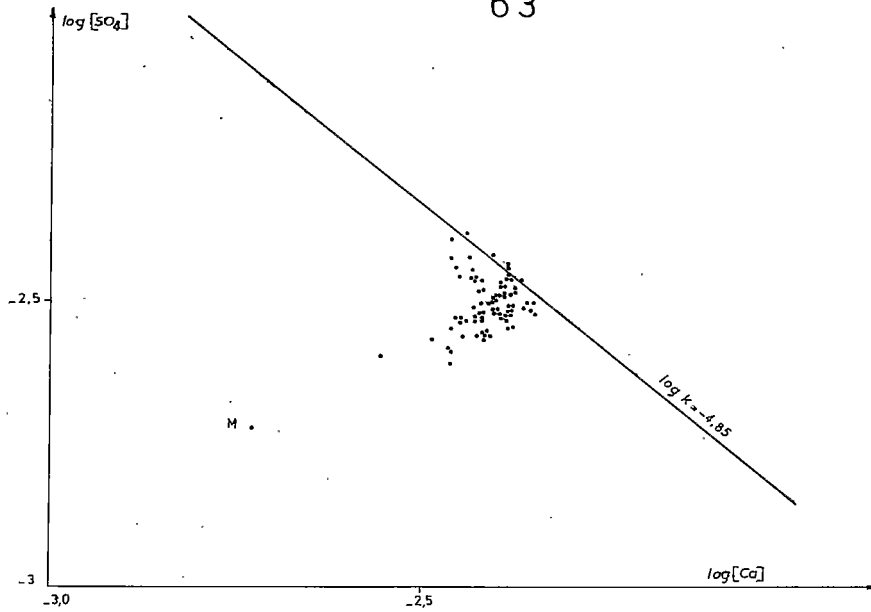


Fig.28-DIAGRAMME DE SATURATION DU GYPSE - ECHANTILLONS F

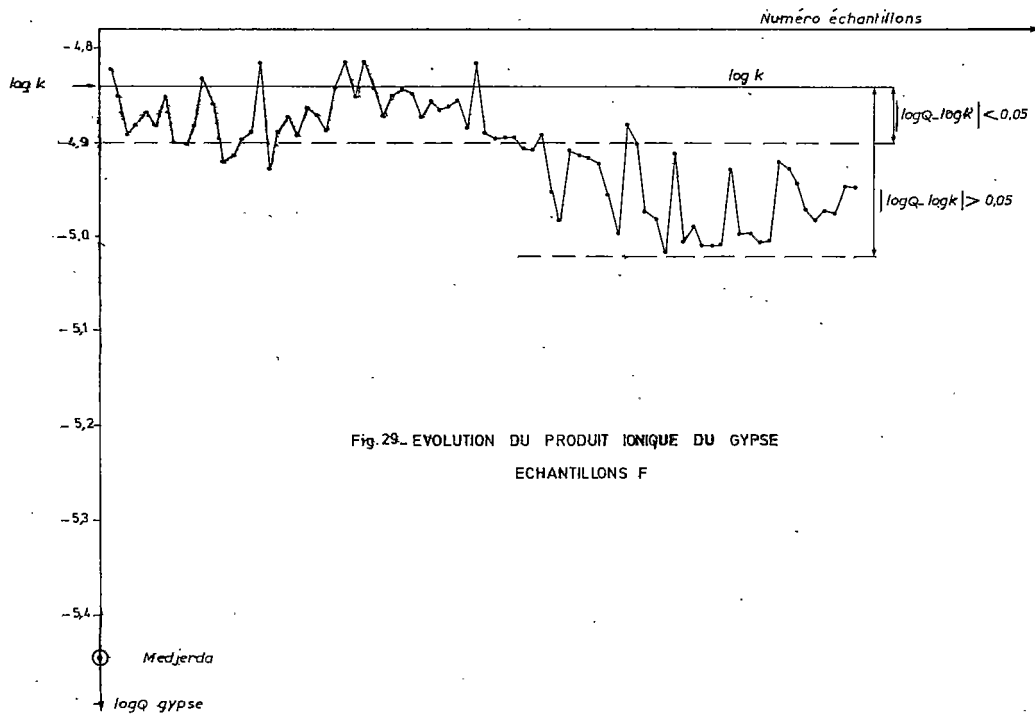


Fig.29- EVOLUTION DU PRODUIT IONIQUE DU GYPSE
ECHANTILLONS F

- de F9 à F42 : les points évoluent selon la droite de saturation théorique. $\log Ca$ augmente, $\log SO_4$ diminue, $\log Q$ et à peu près constant et égal à $\log K$ 25°C. Les solutions sont toutes en équilibre avec le gypse mais se situent à droite de $\log Ca = \log SO_4$ (fig. 31).
- de F43 à F73 : les points évoluent selon une droite parallèle à $\log Ca = \log SO_4$. Le produit ionique des solutions s'éloigne de plus en plus du produit de solubilité du gypse. Les points se rapprochent de l'eau d'irrigation. Les solutions ne sont pas en équilibre avec le gypse (fig. 32).
- de F74 à F82 : Le produit ionique s'élève à nouveau. Les eaux de drainage s'éloignent des caractéristiques de la Medjerdah et sont presque en équilibre avec le gypse (fig. 33).

En résumé lorsque l'on suit la progression de l'eau de drainage dans le diagramme $\log Ca / \log SO_4$ on remarque que dans une première phase F2 à F73, représentant presque tout le drainage, les points évoluent exactement selon le schéma prévu par le calcul de l'alcalinité résiduelle. Cette évolution se fait dans le sens inverse de la concentration (dilution).

Les premiers échantillons représentent l'état de la solution du sol avant le début de l'irrigation. L'eau d'irrigation du front d'humectation se mélange tout au long du profil à la solution du sol et finit par acquérir les caractéristiques de cette dernière. Les eaux de drainage comportent ensuite une proportion de plus en plus élevée d'eau d'irrigation et parcourent en sens inverse le cheminement géochimique de la solution du sol lors de son dessèchement.

Dans un deuxième temps, F73 à F81, correspondent à des écoulements lents et de faible débit, les solutions sont saturées par rapport au gypse. On peut penser qu'il s'agit là d'une microporosité peu diluée par l'eau d'irrigation et continuant à couler lorsque le sol est ressuyé, c'est-à-dire quand la macroporosité est vide d'eau.

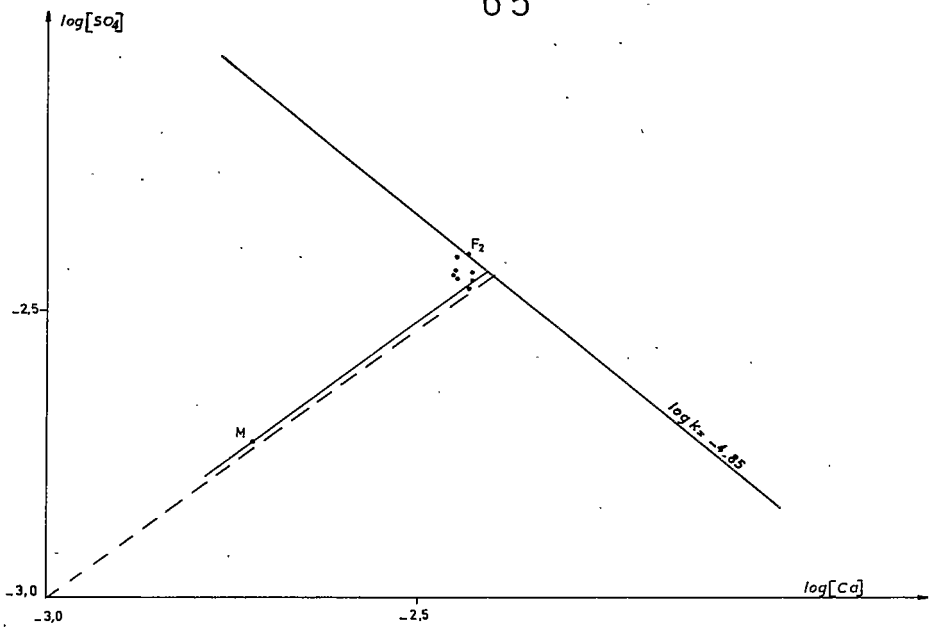


Fig.30 DIAGRAMME DE SATURATION DU GYPSE - ECHANTILLONS F1 - F8

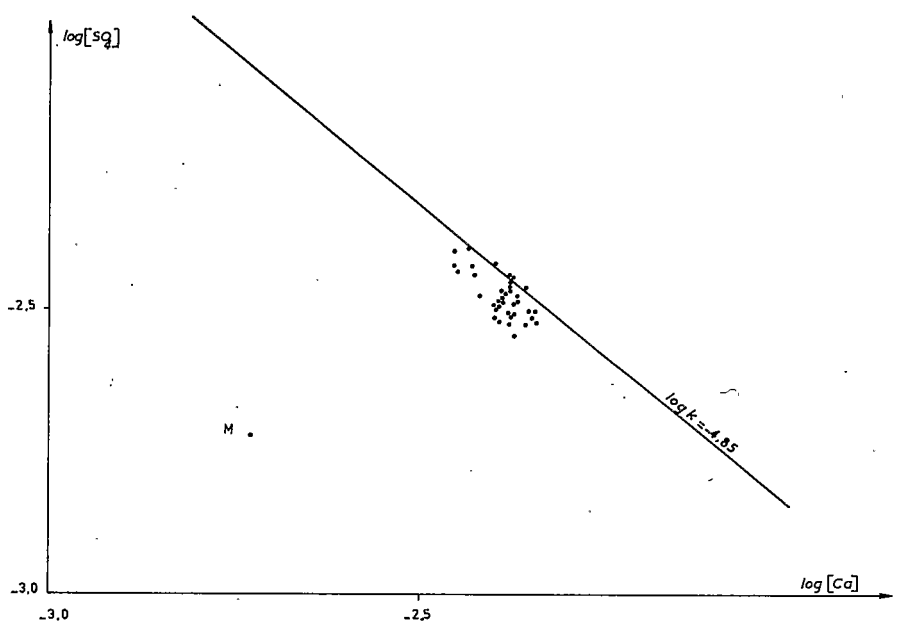


Fig.31 DIAGRAMME DE SATURATION DU GYPSE - ECHANTILLONS F9 - F42

66

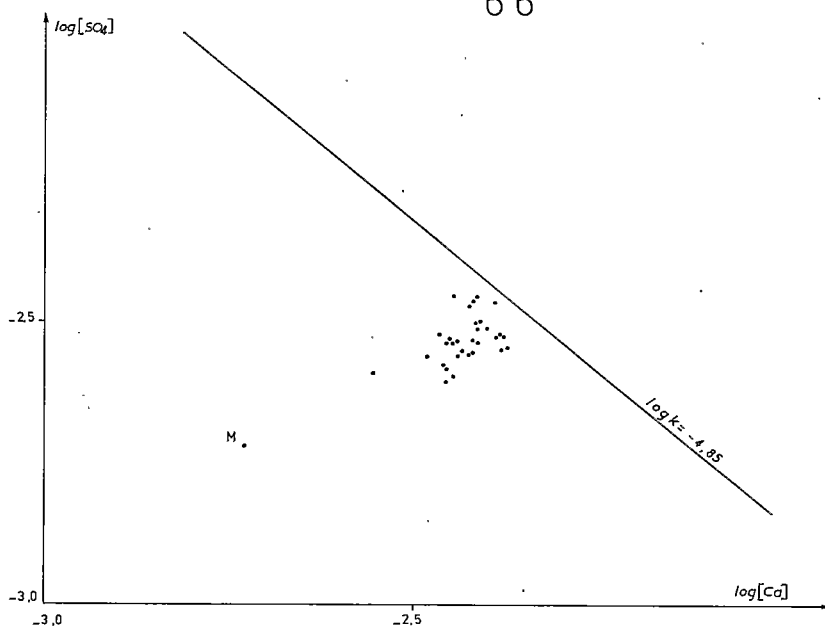


Fig.32 - DIAGRAMME DE SATURATION DU GYPSE - ECHANTILLONS F₄₃ - F₇₃

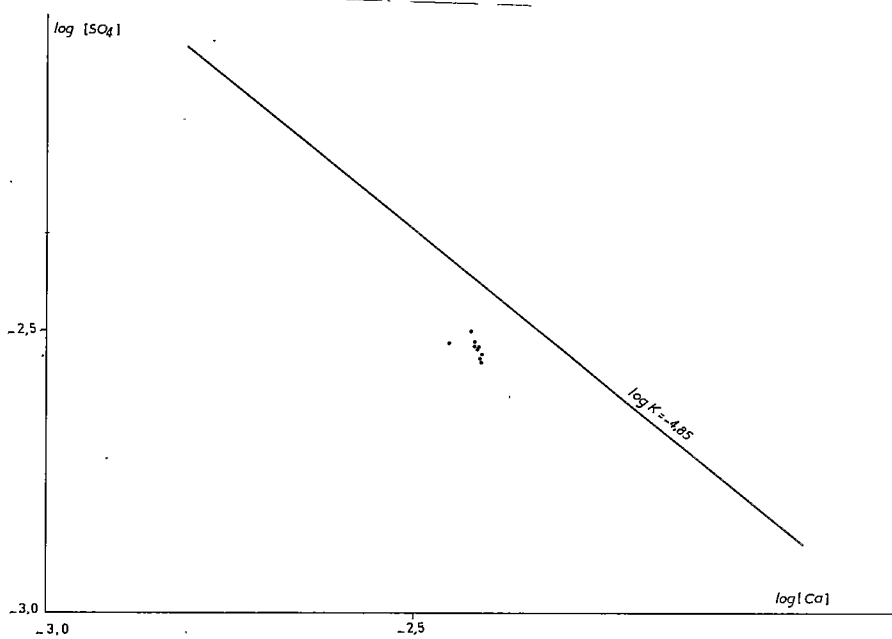


Fig.33 - DIAGRAMME DE SATURATION DU GYPSE - Echantillons F₇₄ - F₈₁

Le résultat est comparable à celui obtenu sur le calcul de pCO_2 . Le front d'humectation est constitué par une eau reflétant les caractéristiques de la solution du sol : pCO_2 élevé, forte teneur en sels. A l'arrière de ce front, les solutions évoluent très vite vers l'eau d'irrigation à faible pCO_2 , faible teneur en sels, et correspondent aux forts débits. Lors d'une dernière étape, lorsque les écoulements sont lents et réduits, les solutions évoluent vers une composition intermédiaire entre les deux états précédents : remontée de pCO_2 et du taux de sels.

Dans le cas du monolithe, la cinétique de dissolution du gypse ne peut pas expliquer le cheminement des solutions de drainage dans le diagramme $\log Ca$, $\log SO_4$. Les points F2 à F8 qui représentent les termes les plus concentrés, sont situés au dessous de la droite $\log Ca$, $\log SO_4$. Il en est de même pour l'eau d'irrigation. Si le gypse ne se dissolvait pas assez vite pour maintenir les solutions en équilibre avec le gypse, les points s'aligneraient suivant la droite reliant l'eau d'irrigation au groupe F2 à F8. Ils seraient tous au dessus de la droite $\log Ca = \log SO_4$. On observe le contraire.

CONCLUSIONS

L'étude chimique des eaux de drainage nous a permis de dégager les points suivants :

- L'importance des mesures de pH et de l'alcalinité et surtout du délai s'écoulant entre la prise des échantillons et leur analyse. Ceci est important pour le calcul de la solubilité de la calcite et de la magnésite.
- L'équilibre des solutions du sol avec la calcite et la magnésite. Les produits de solubilité indiquent qu'il s'agit de minéraux bien cristallisés.
- Alors que les échantillons de la série D ne sont pas à saturation par rapport au gypse, les séries E et F confirment sa présence dans le monolithe ainsi que le sens d'évolution chimique des solutions prévues par l'alcalinité résiduelle.
- Enfin, l'étude géochimique des eaux de drainage fournit des indications sur les écoulements dans le sol et sur la porosité.

Les premières solutions s'écoulant du monolithe reflètent les caractéristiques de la solution du sol avant l'irrigation. Elles évoluent ensuite vers l'eau d'irrigation. Lors du ressuyage du sol, lorsque les débits sont faibles, les eaux de drainage deviennent à nouveau riches en CO₂ et chargées en sel.

On peut difficilement attribuer ce phénomène à la cinétique de dissolution du gypse. L'existence de classes de porosité de vitesses d'écoulement différentes et dont les sels diffuseraient de l'une vers les autres paraît mieux expliquer les faits observés.

BIBLIOGRAPHIE

- CHEVERRY C. (1974). Contribution à l'étude pédologique des polders du lac Tchad. Dynamique des sels en milieu continental subaride dans les sédiments argileux et organiques.
Thèse Sci. Strasbourg, ORSTOM, 257 p. multigr.
- DOSSO M. (1980). Géochimie des sols salés et des eaux d'irrigation. Aménagement de la base vallée de l'Euphrate en Syrie.
Thèse Doct. Ing. Toulouse, 181 p.
- DROUBI A. (1976). Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation. Application aux sols salés du Tchad.
Thèse Doct. Ing. Strasbourg, 177 p.
- EL OUMRI M. (1978). Application de la méthode électrique à l'étude de la salure des sols.
Rapport de stage DRES-ORSTOM. 60 p.
- EL OUMRI M. (1981). Conditions d'utilisation de la méthode des sondages électriques pour l'étude des sols halomorphes.
Thèse 3ème cycle Paris VII.
- FRITZ B. (1975). Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solution. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales.
Thèse Doct. Ing. Strasbourg, 152 p.
- NADLER A. (1981). Field application of the four electrode technique for determining soil solution conductivity. Soil Sc. Soc. Am. J. 45-b. pp. 30-34.
- NADLER A. , FRENEL H. (1980). Determination of soil solution electrical conductivity measurements by the four electrode method. Soil Sc. Soc. Am. J. 44-6 pp. 1216-1221.
- RHOADES J.D., R.D. INGVALSON (1971). Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. Soil Sc. Soc. Am. J. 35 pp. 54-60.
- RHOADES J.D., J. VANSCHIEFGAARDE (1976-a). An electrical conductivity probe for determining soil salinity. Soil Sc. Soc. Am. J. 40 pp. 647-651.
- RHOADES J.D., P.A.C. RAATS, R.J. PRATHER (1976-b). Effect of liquid phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Sc. Soc. Am. J. 40, pp. 651-655.

- RHOADES J.D., M. T. KADDAH, A.D. HALVORSON, R.J. PRATHER (1977).
Establishing soil electrical conductivity-salinity calibrations using four electrode cells containing undisturbed soil cores. Soil Sc. 123-3 pp. 137-141.
- SHAINGERG I., J.D. RHOADES, R.J. PRATHER (1980). Effect of exchangeable sodium percentage, cation exchange capacity and soil solution concentration on soil electrical conductivity. Soil. Sc. Soc. Am. J. 44 pp. 469-473.
- UNESCO. (1970). Tunisie. Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. Tech. Rpt. UNESCO UNSP(SF) - Tunis, Paris, 243 p.
- U.S.D.A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.
- VALLES V. et VALLES A.M (1982). Etude méthodologique des transferts d'eau et des sels dans un monolithe de sol argileux. 2^{ème} partie : Caractérisation hydrodynamique et modélisation des transferts d'eau. Rapport ORSTOM-DRES Tunis, 47 p.
- VIELLEFON J., OLIVE P., HUBERT P. (1982). Etude méthodologique des transferts d'eau et des sels dans un monolithe de sol argileux. 1^{ère} partie. Essai préliminaires de caractérisation des transferts. ORSTOM-DRES Tunis.
- WESSELING J. , J.D. OSTER (1973). Response of salinity sensors to rapidly changing salinity. Soil Sc. Soc. Am. J. 37 pp.553-557.