Pôle régional de recherche
sur les systèmes irrigués
en Afrique soudano-sahélienne

Lutte contre la Dégradation des sols dans la vallée du fleuve Sénégal

Synthèse sur l'évolution des Sols sous culture (Sénégal)

Claude HAMMECKER
Jean Luc MAEGHT

Institut de recherche
pour le développement
Agriculture irriguée durable
dans la vallée du Sénégal

B.P. 1386 Dakar Sénégal
Fax : (221) 8 32 43 07
Téléphone : 8 32 34 80

Mai 1999

Evolution des sols sous culture
Dans la vallée du fleuve Sénégal

Plusieurs sites ont été étudiés dans la vallée du fleuve Sénégal, en particulier situés dans la région de Podor, (moyenne vallée aval) ainsi que dans le Delta. Dans la moyenne vallée les études se sont concentrées plus particulièrement sur les sites de Donaye IT 1 (thèse F. Favre) ainsi que sur le site expérimental de Fanaye (ISRA –ADRAO) (thèse R. Samba Diene, 1997). Dans le delta les études ont porté sur le site expérimental de l'ADRAO à Ndiaye (R. Samba Diene, 1997)

1. Site de Donaye, périmètre IT1

La parcelle étudiée est localisée dans un périmètre villageois non drainé, sur un sol vertique à texture argileuse (à plus de 65% d'argiles), généralement exploitée en double riziculture. Ce site est caractérisé par la présence d'une nappe dont le toit oscille entre 1 et 2.5 m. Cette nappe présente un faciès chimique chloruré sodique et sulfaté, témoignant de la présence d'anciennes intrusions marines. Le niveau de la nappe est gouverné essentiellement par les variations de hauteur d'eau dans le fleuve ainsi que par l'irrigation dans une moindre mesure.

Un réseau de piézomètres ainsi que deux sites de mesure tensiométriques sont installés sur la parcelle (figure 1).

La quantification des flux hydriques est assurée par un suivi plus ou moins intense de ce dispositif de mesure depuis 1994. Le suivi des solutions (eaux d'irrigation, lame d'eau superficielle, bougies poreuses) a été assuré de manière continue pour l'hivernage 97 et la contre saison chaude 98. Les bougies poreuses ont été placées à 20 40 et cm de profondeur. Pour la culture d'hivernage 97, en compléments des mesures normales, les transferts d'eau ont été bloqués à différentes hauteurs (20 et 40 cm) par la mise en place de bâches plastiques, de manière à déterminer l'influence des transferts sur l'évolution du chimisme de l'eau.

Les résultats sont présentés par leur évolution en fonction du temps lorsque le nombre de mesures est suffisant et /ou dans des triangles de Piper.

Pour la saison d'hivernage 97, il apparaît que la solution du sol se concentre dans les horizons supérieurs alors que l'eau de surface reste à une concentration constante tout au long de la culture. Ce phénomène est d'autant plus marqué lorsque les flux sont bloqués par les bâches en plastique. Ceci suggère la présence de sels dans ces horizons se dissolvant progressivement au cours de la campagne, qui normalement migrent progressivement en profondeur. Les ions qui semblent les plus abondamment concentrés dans les horizons superficiels sont les carbonates + bicarbonates (alcalinité), le sodium, et le Magnésium. Pour le calcium cette tendance est moins marquée si ce n'est que l'on observe une lente concentration en profondeur (60 cm). D'un autre côté les sulfates

présentent une concentration très basse en surface alors qu'ils sont largement dominant et augmentent en profondeur. Par ailleurs il est intéressant de noter que le dans les horizons supérieurs la teneur en sulfate augmente au cours du temps dans les bougies libres à 20 et 40 cm alors que dans les bougies bloquées par la bâche plastique, les sulfates restent à des valeurs extrêmement faibles. Dans ce cas il semble que le profil soit alimenté en sulfates par la base, en l'occurrence par la nappe. Pour les chlorures la tendance est à la baisse pour les horizons supérieurs, alors que l'on observe une augmentation à 60 cm. Cette observation suggère la présence de minéraux ou de solutions chlorurées accumulées dans les horizons supérieurs pendant l'inter-culture, qui se dissolvent ou se dilue pendant la saison culturale, pour migrer en profondeur. On est donc en présence d'une part d'un flux descendant pour les chlorures et la plupart des cations alors que l'on observe un flux ascendant pour les sulfates ce qui suggère un phénomène de diffusion moléculaire prépondérant sur le processus de transport de masse. Cette hypothèse étant étayée par le fait que les transferts d'eau sont extrêmement faibles (de l'ordre de 0.1mm/j) lorsque la lame d'eau est bien établie (Hammecker et al,1998, 1999).

Cependant l'évolution des chlorures dans la partie supérieure du profil pose problème car la diminution de la concentration au cours du temps affecte également les bougies pour lesquelles les transferts sont bloqués. Plusieurs hypothèses sont actuellement envisagées sans qu'aucune ne soit démontrée (Favre et al. 1999).

Composition de la nappe à Donaye

Cl	SO4	alc.	Ca	Mg	Na	K
			meq/l			
0.71	4.3	0.67	1	0.89	4.1	0.09

Complexe d'échange à Donaye

Ca	Mg	Na	K	CEC
		meq/100g		
12.27	8.39	0.47	0.57	21.7

Evolution géochimique.

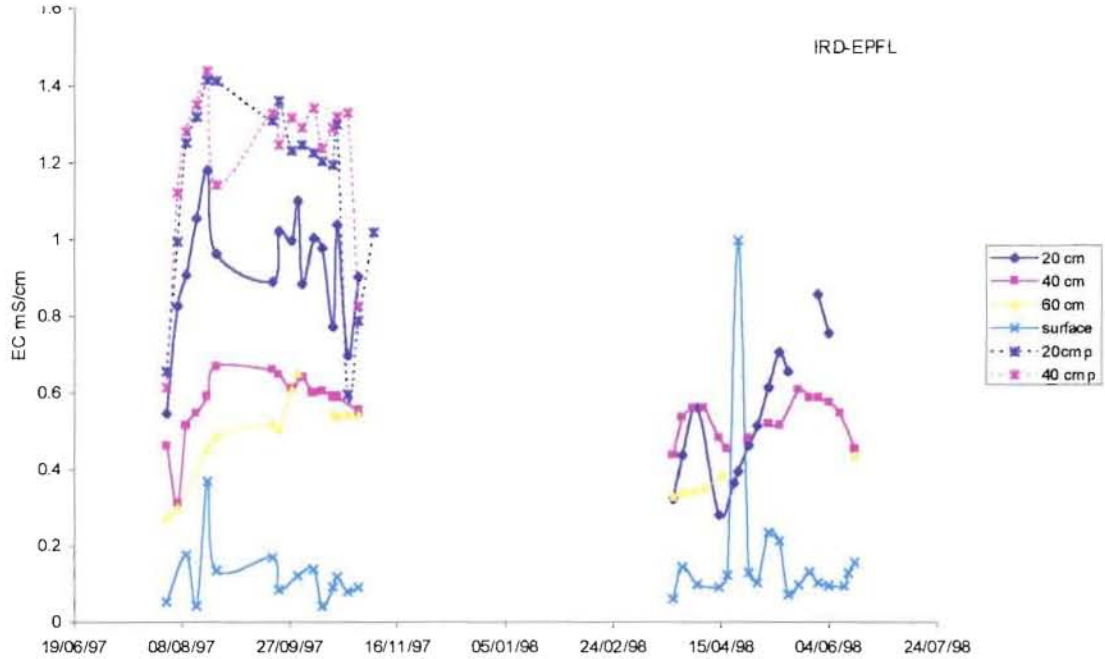
Il apparaît clairement que sur ce site deux faciès géochimiques bien distinct sont présents : Carbonaté calcique et magnésien dans les niveaux supérieurs (qui correspond à l'eau de surface plus concentrée) et sulfaté – chloruré sodique en profondeur (Favre et Boivin, 1998).

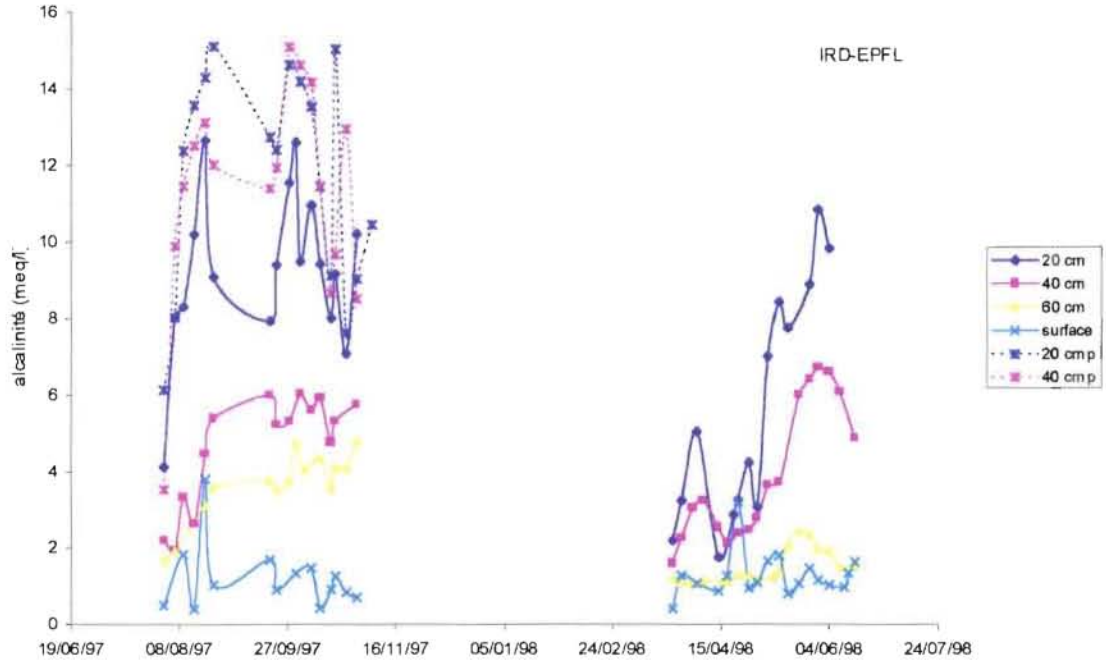
Sur l'ensemble du profil l'alcalinité résiduelle calcite est positive et augmente au cours de la culture. Ce phénomène est d'autant plus marqué lorsque les transferts sont bloqués. L'alcalinité résiduelle calcite + silicate magnésien (ou carbonate de magnésium) est également très largement positive sauf pour le niveau à 60 cm lors de la culture de contre saison 98. Il faut préciser que lors des campagnes de contre saison la nappe est généralement moins haute que lors de la campagne d'hivernage pendant laquelle elle répond directement à la remontée de niveau d'eau dans le fleuve. Pendant cette période le profil en général moins marqué par le faciès « marin » que pendant la contre saison.

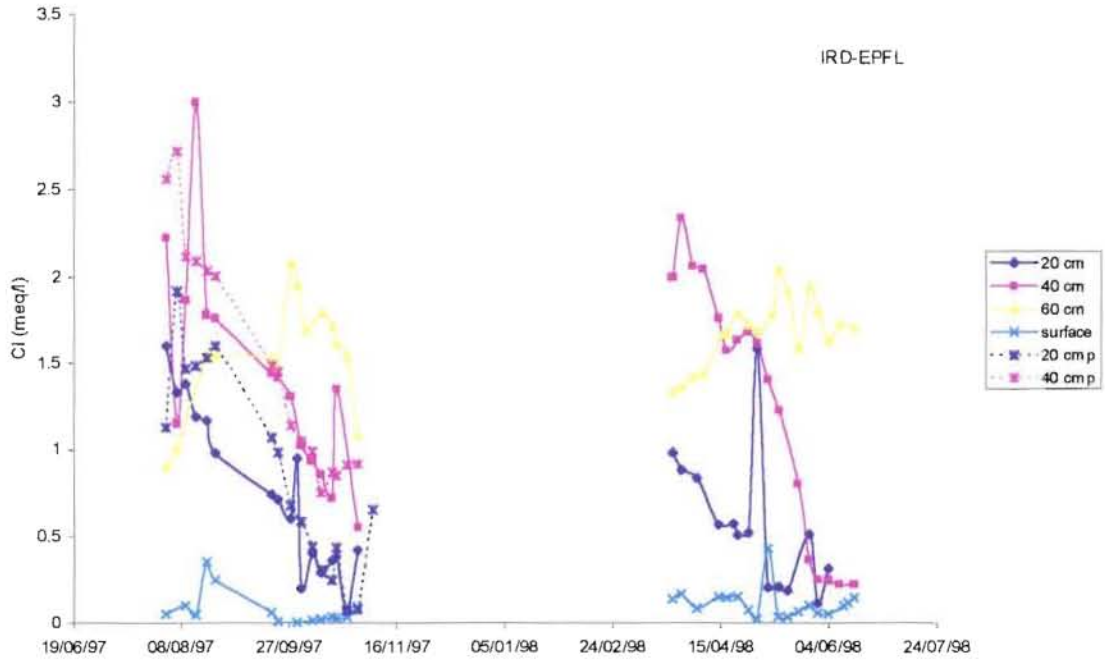
Il existe donc un stock d'alcalinité dans les horizons supérieurs, dont l'origine est indéniablement due aux différents cycles d'irrigation qu'a subit le sol. Ce stock est essentiellement exprimé par la présence de calcite (cf. diagramme Q/K calcite) dans ces horizons. Cependant malgré la présence de solutions de sol potentiellement alcalinisantes le pH ne varie pas de manière sensible et les solutions restent dans un domaine où le risque d'alcalinisation est faible (diagramme Riverside). Il semble en particulier que l'activité racinaire contribue en partie à tamponner le pH à des valeurs autour 7.5 – 8 dans la rhizospère. Après chaque saison de culture le faciès marin imposé par les niveaux inférieurs semble redevenir prédominant par remontées capillaires, sans toute fois arriver à saturation par rapport au gypse, le calcium étant fortement contrôlé par la précipitation de calcite. L'évolution vers un pôle alcalin se trouve ainsi atténuée tant que le stock de sels laissé en place par lors des anciennes transgressions marines est suffisant. Par ailleurs, le complexe d'échange représente un tampon extrêmement important permettant de fournir d'importantes quantités de calcium et de magnésium à la solution.

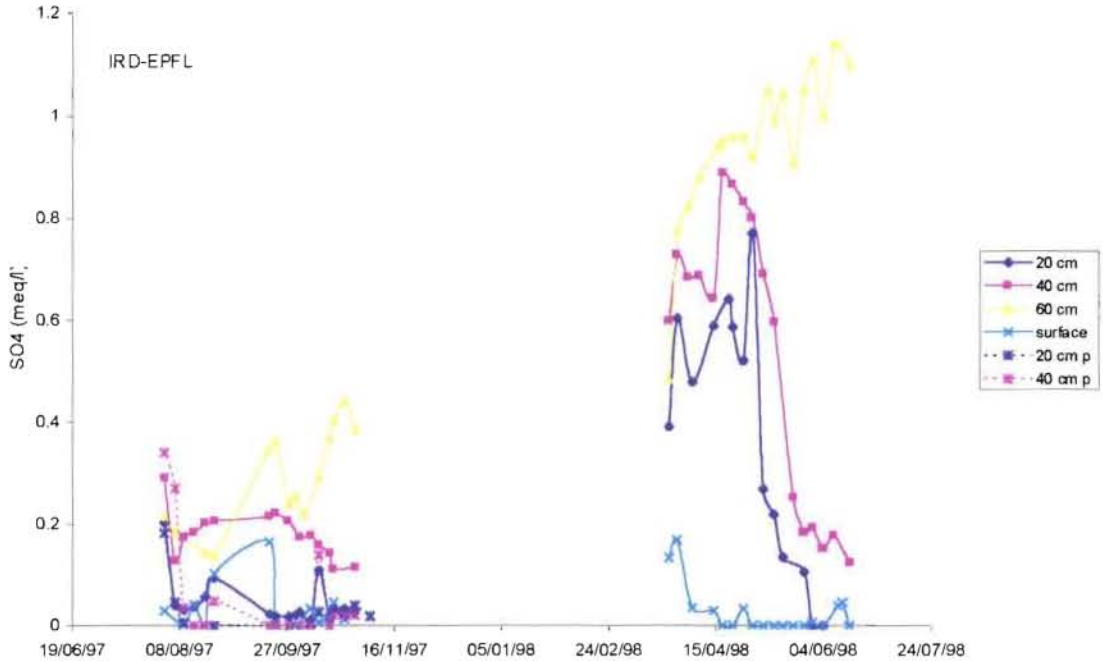
Comme le montrent les résultats pour les saisons d'hivernage où la nappe alimentée par le fleuve atteint des côtes élevées, permettant d'évacuer les sels d'origine marine très solubles. En outre les cartes de répartition de la salinité établies au conductivimètre électromagnétique (EM38) à différentes périodes, montre qu'il y a indéniablement une diminution de la charge saline à l'échelle de la parcelle. Celle-ci, principalement due à la présence des sels d'origine marine, est donc amenée à se résorber à plus ou moins longue échéance et donc de laisser l'avantage au faciès alcalin imposé par l'eau d'irrigation.

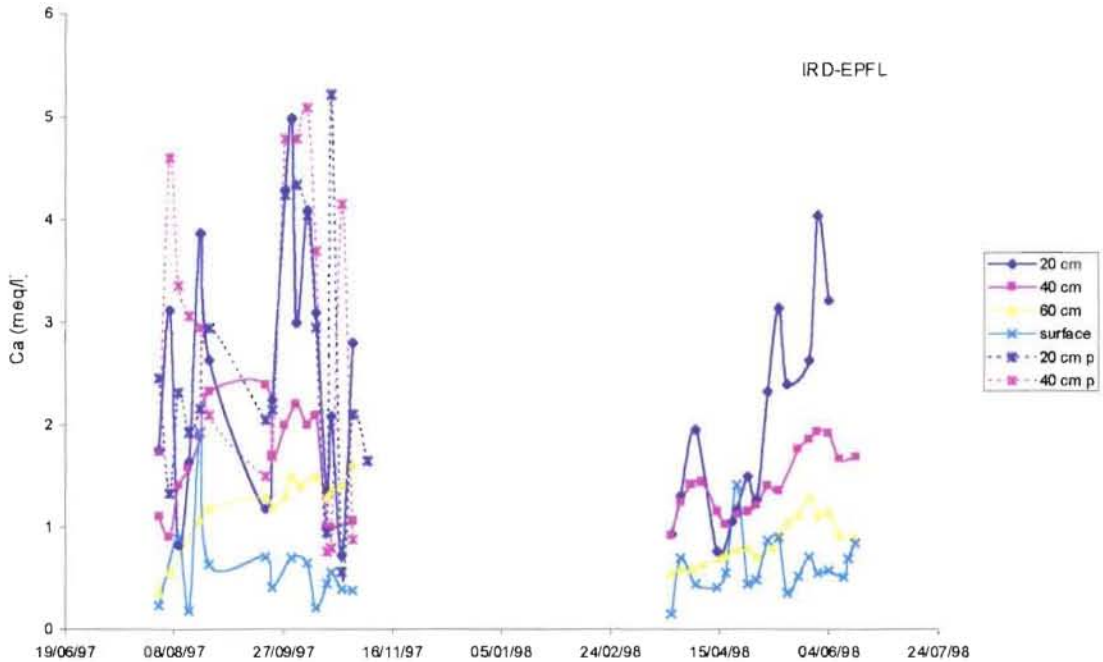
La menace d'alcalinisation risque donc de s'exprimer à long terme lorsque comme dans l'office du Niger la nappe aura acquis un faciès alcalin marqué.

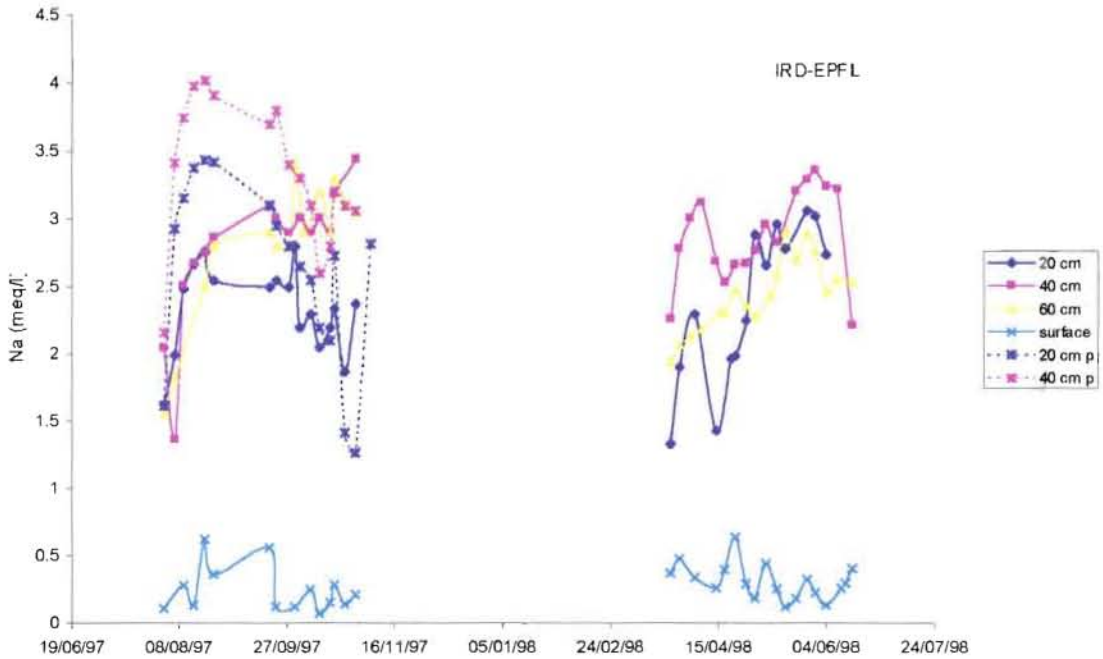

IRD-EPFL
EC mS/cm
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20cm p
40 cm p

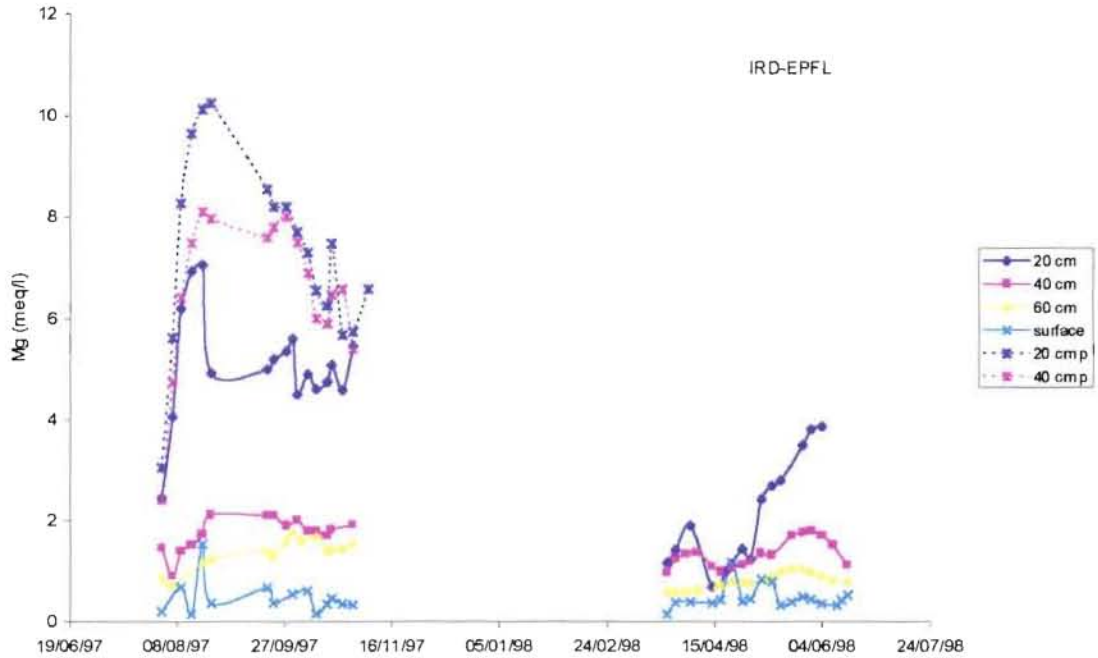

IRD-EPFL
alcalinité (meq/l)
16
14
12
10
8
6
4
2
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

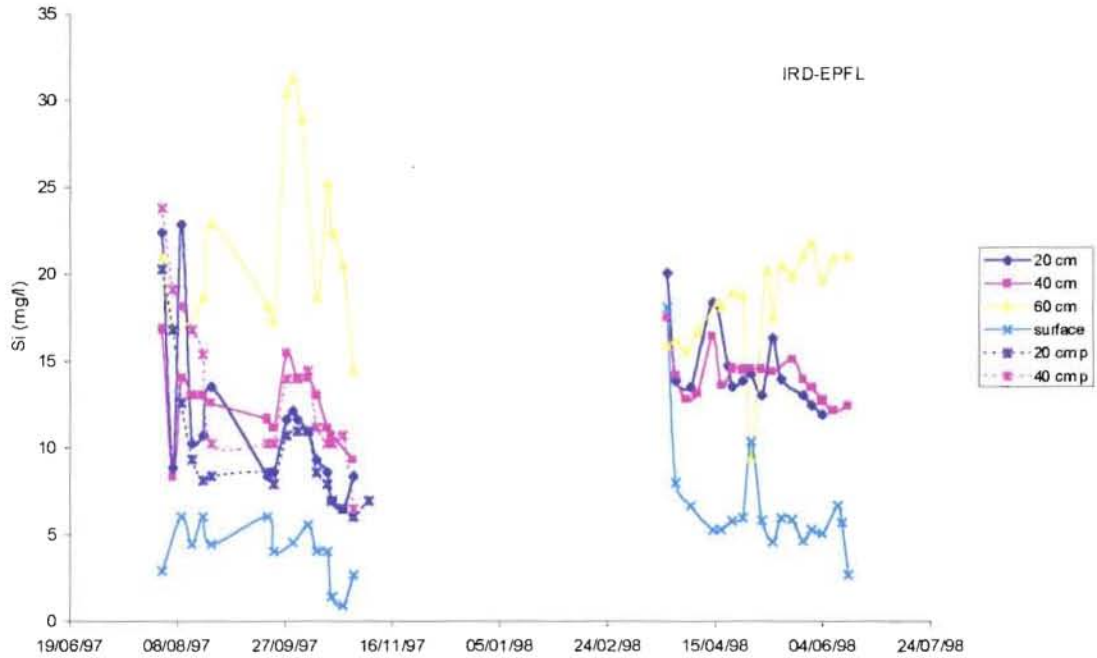

IRD-EPFL
Cl (meq/l)
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

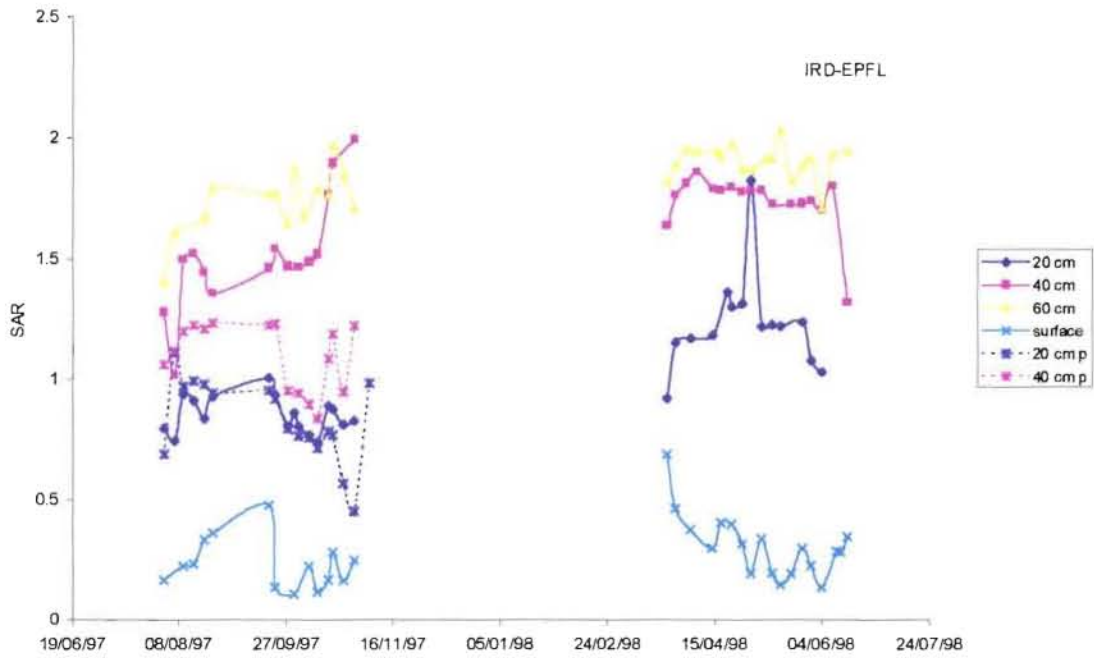

IRD-EPFL
SO4 (meq/l)
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

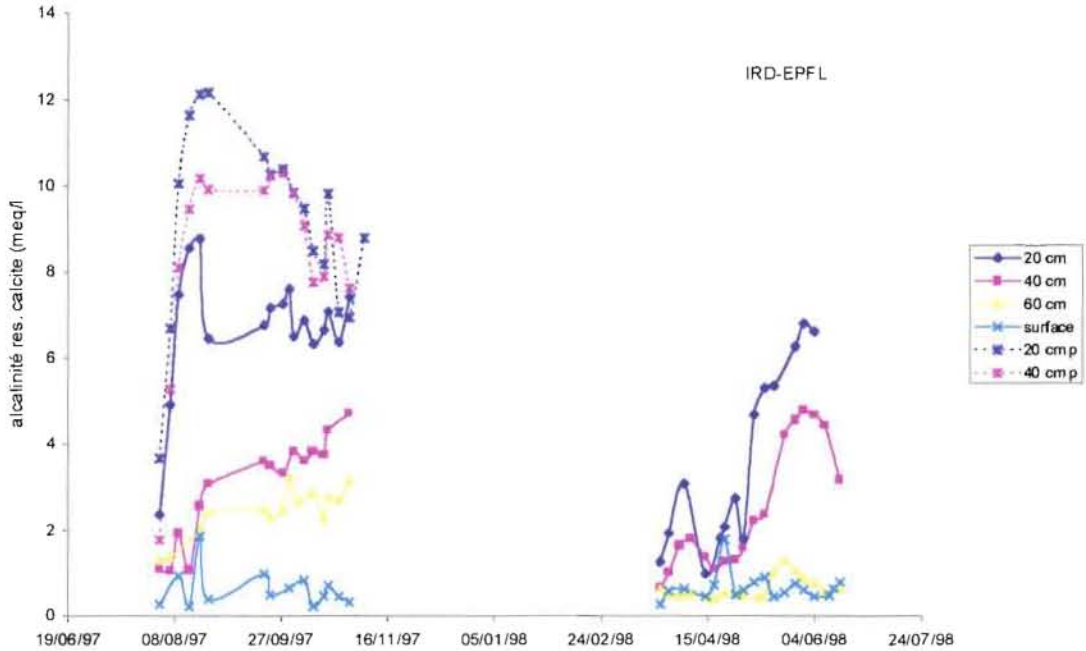

IRD-EPFL
Ca (meq/l)
6
5
4
3
2
1
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

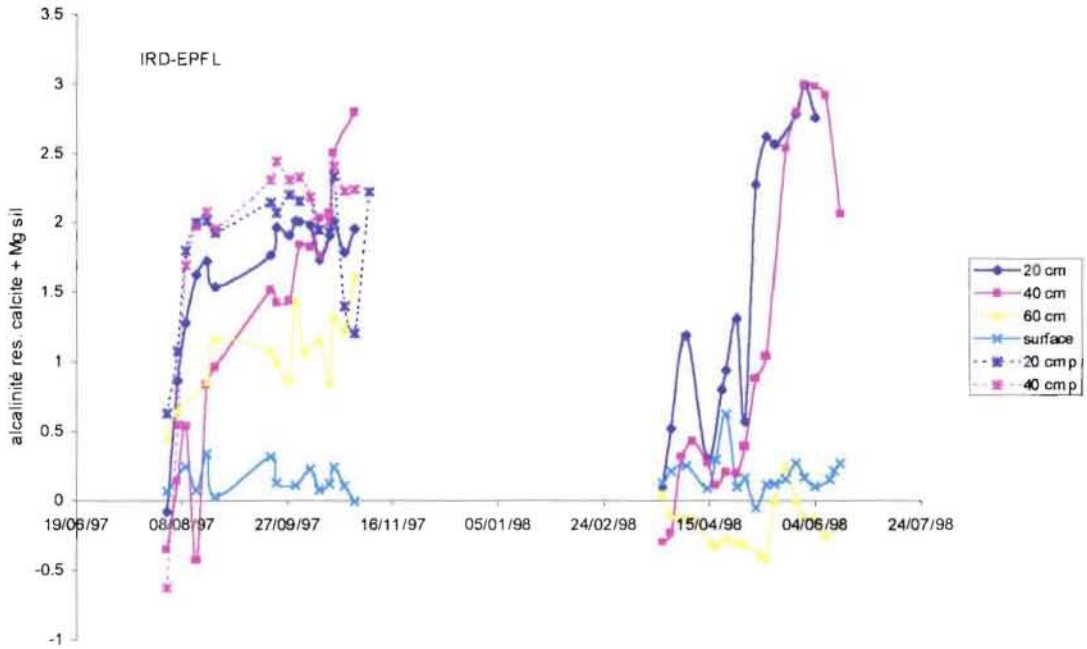

IRD-EPFL
Na (meq/l)
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

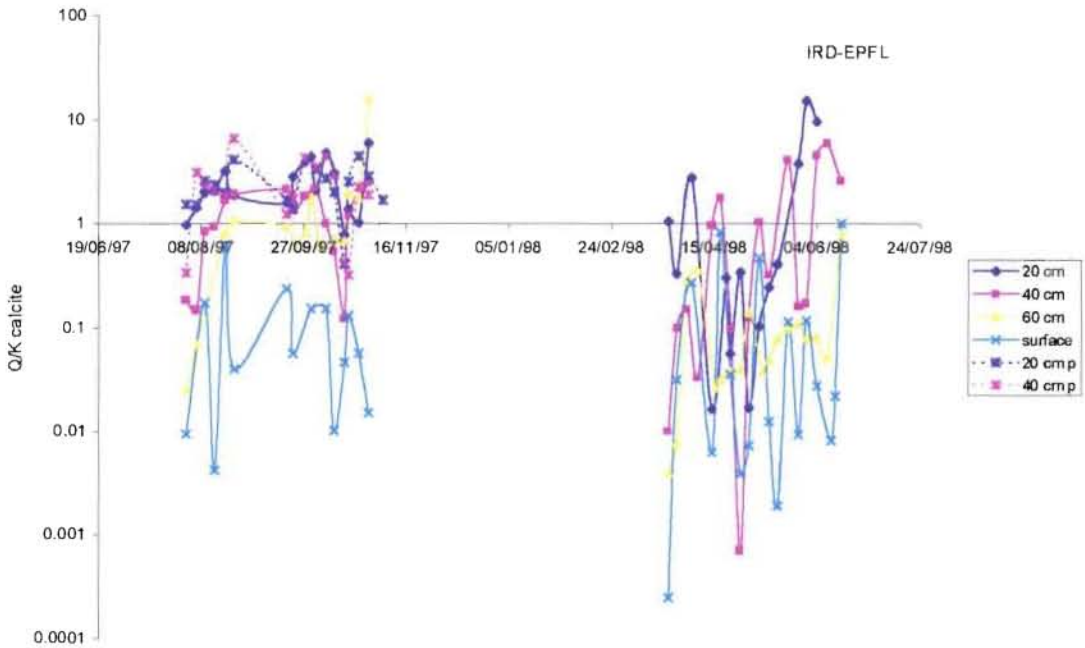

IRD-EPFL
Mg (meq/l)
12
10
8
6
4
2
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

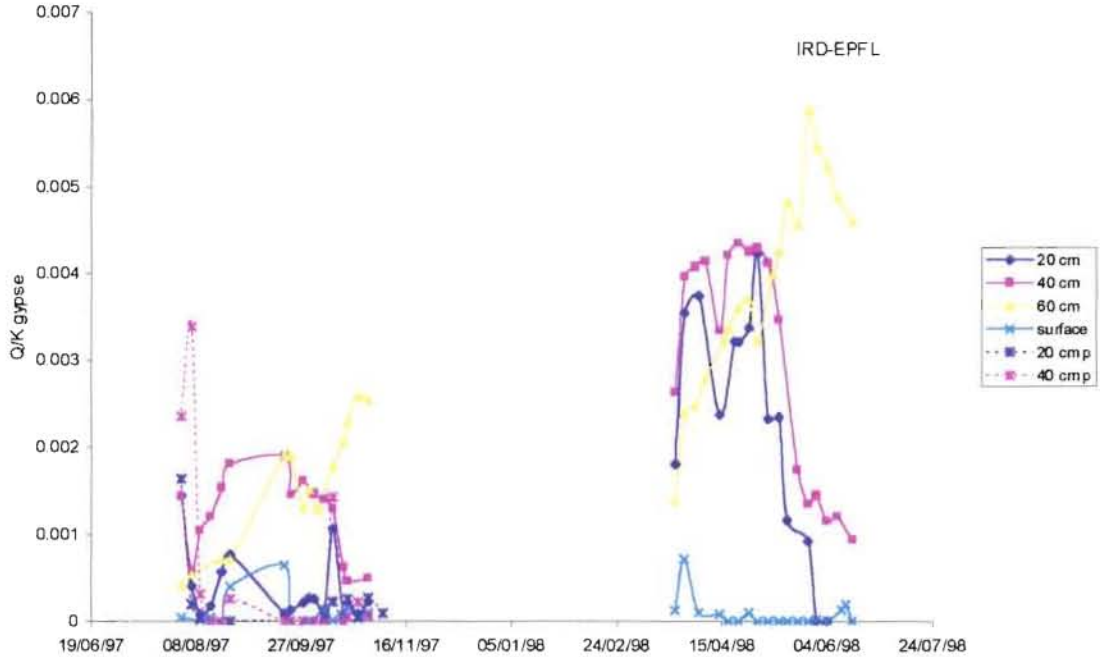

IRD-EPFL
Si (mg/l)
35
30
25
20
15
10
5
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

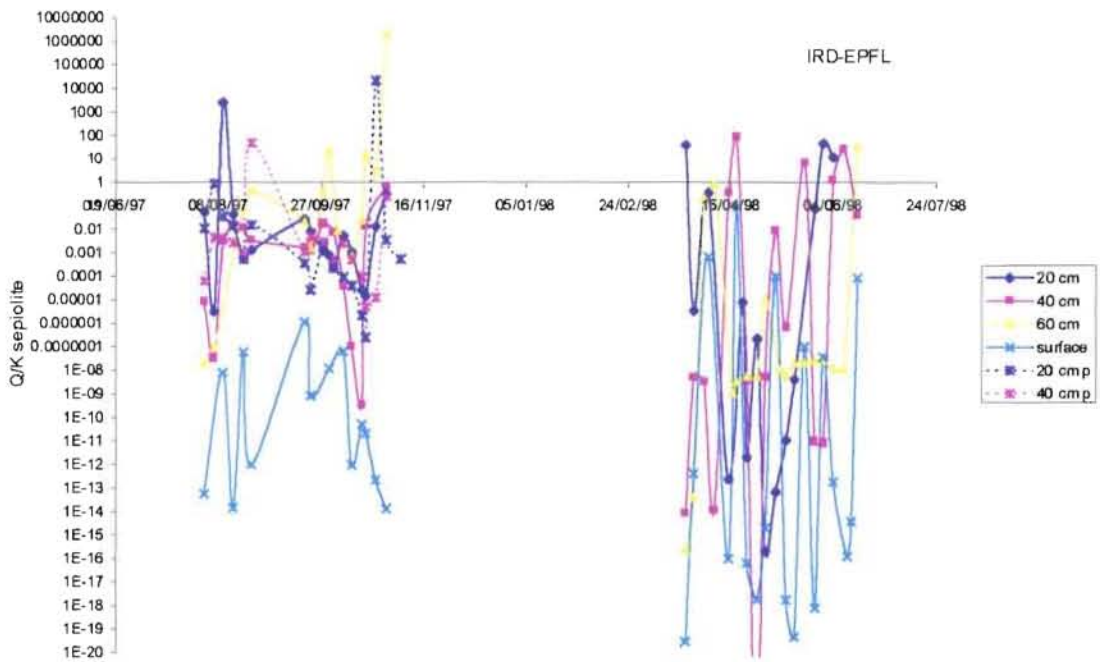

IRD-EPFL
SAR
2.5
2
1.5
1
0.5
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

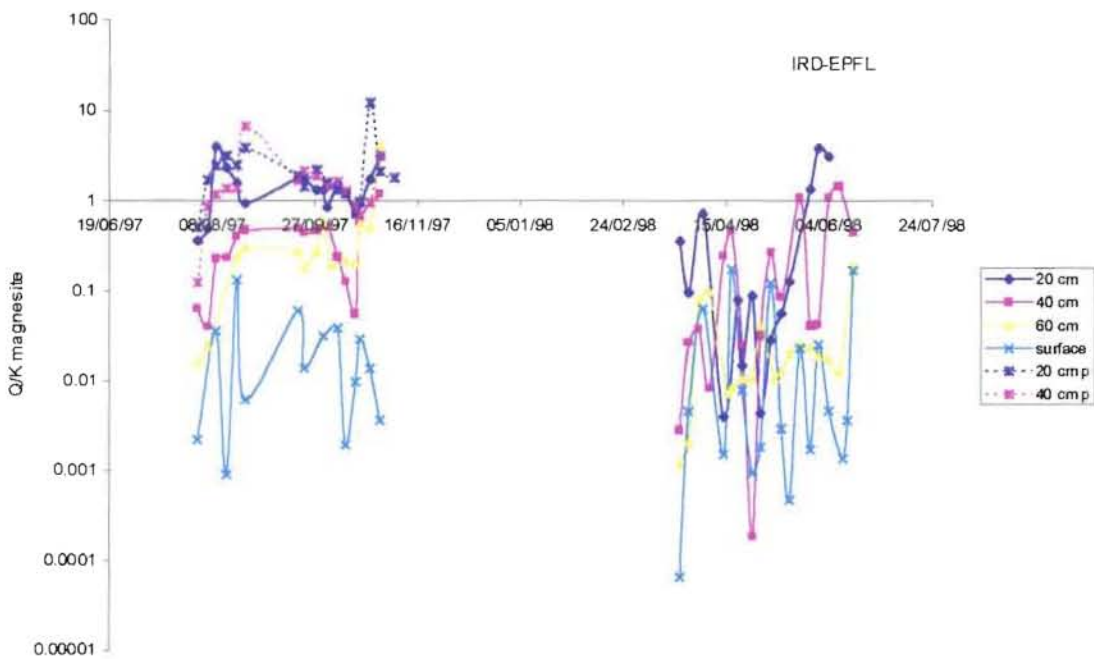

IRD-EPFL
alcalinité res. calcite (meq/l
14
12
10
8
6
4
2
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p

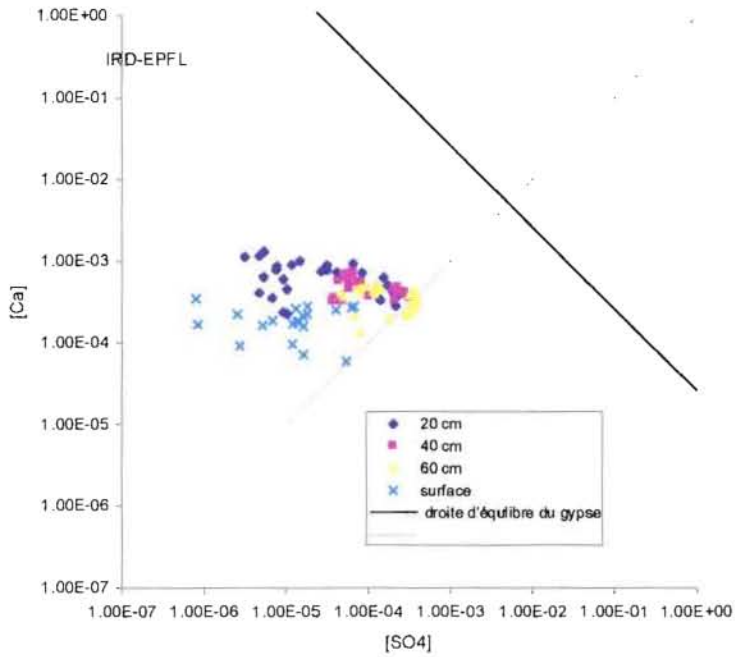

IRD-EPFL
alcalinité res. calcite + Mg sil
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p


IRD-EPFL
Q/K calcite
100
10
1
0.1
0.01
0.001
0.0001
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cm p
40 cm p


IRD-EPFL
Q/K gypse
0.007
0.006
0.005
0.004
0.003
0.002
0.001
0
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cmp
40 cmp


IRD-EPFL
Q/K sepiolite
10000000
1000000
100000
10000
1000
100
10
1
0.01
0.001
0.0001
0.00001
0.000001
0.0000001
1E-08
1E-09
1E-10
1E-11
1E-12
1E-13
1E-14
1E-15
1E-16
1E-17
1E-18
1E-19
1E-20
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cmp
40 cmp


IRD-EPFL
Q/K magnesite
100
10
1
0.1
0.01
0.001
0.0001
0.00001
19/06/97
08/08/97
27/09/97
16/11/97
05/01/98
24/02/98
15/04/98
04/06/98
24/07/98
20 cm
40 cm
60 cm
surface
20 cmp
40 cmp



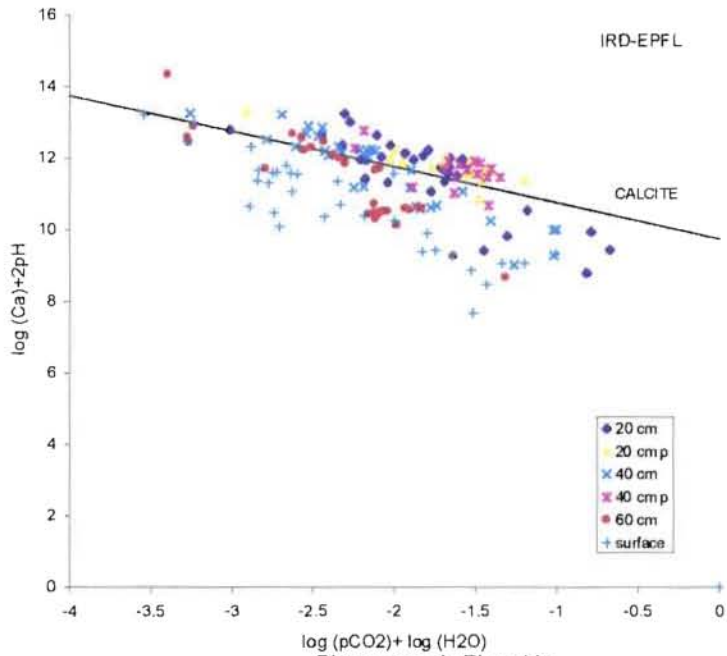
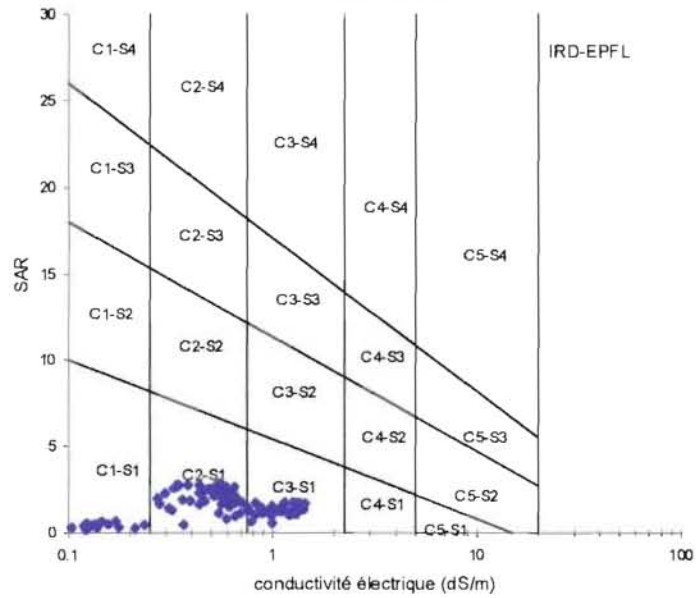
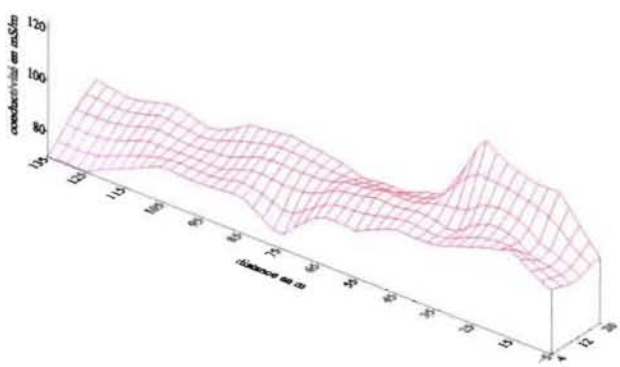
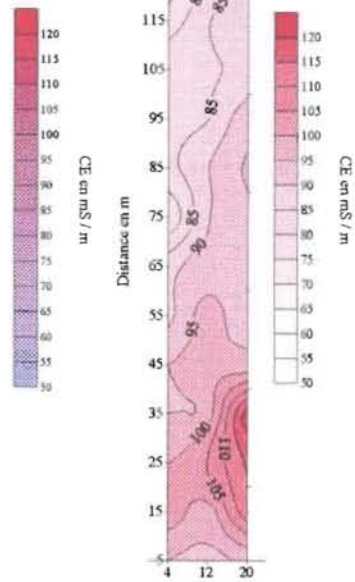


Diagramme de Riverside
Donaye IT1



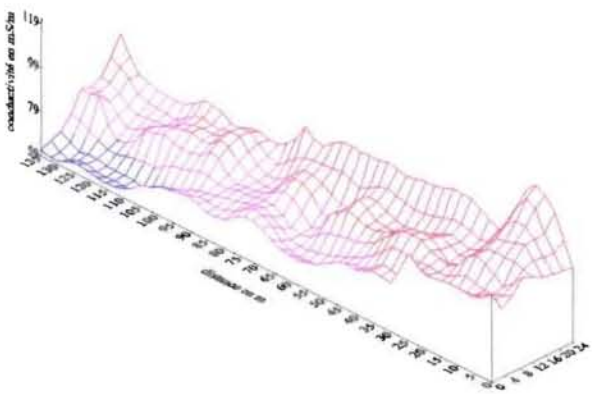
Carte de conductivité électromagnétique
Parcelle de donaye IT1 csc 94

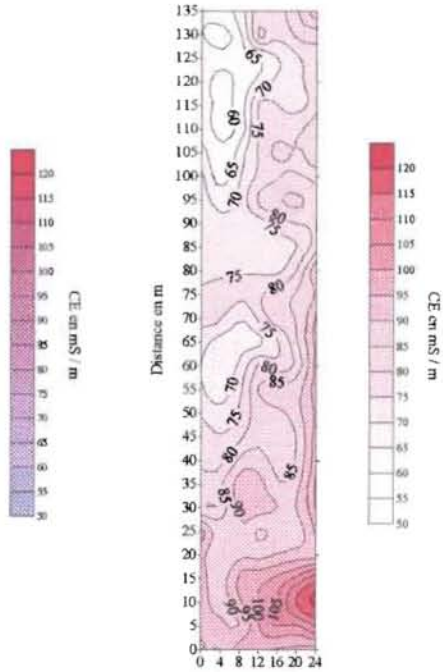




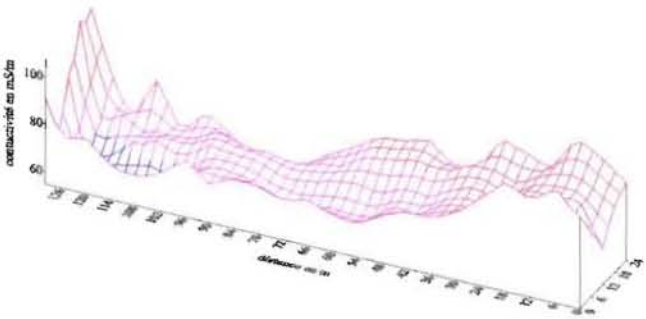
Jean-Luc MAEGHT

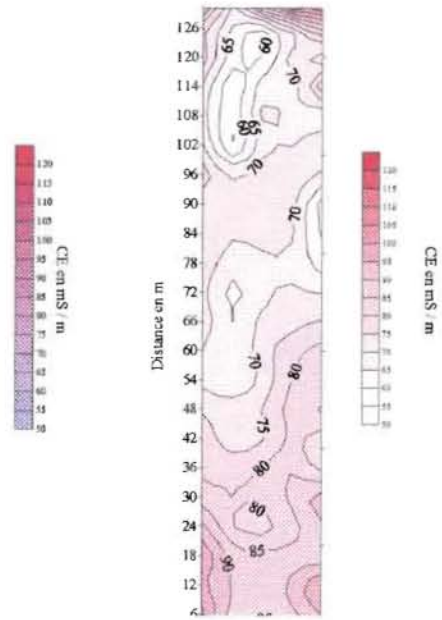
Carte de conductivité électromagnétique
Parcelle de donaye IT1 csc 97





Carte de conductivité électromagnétique
Parcelle de donaye IT1 csc 99 au 28-04

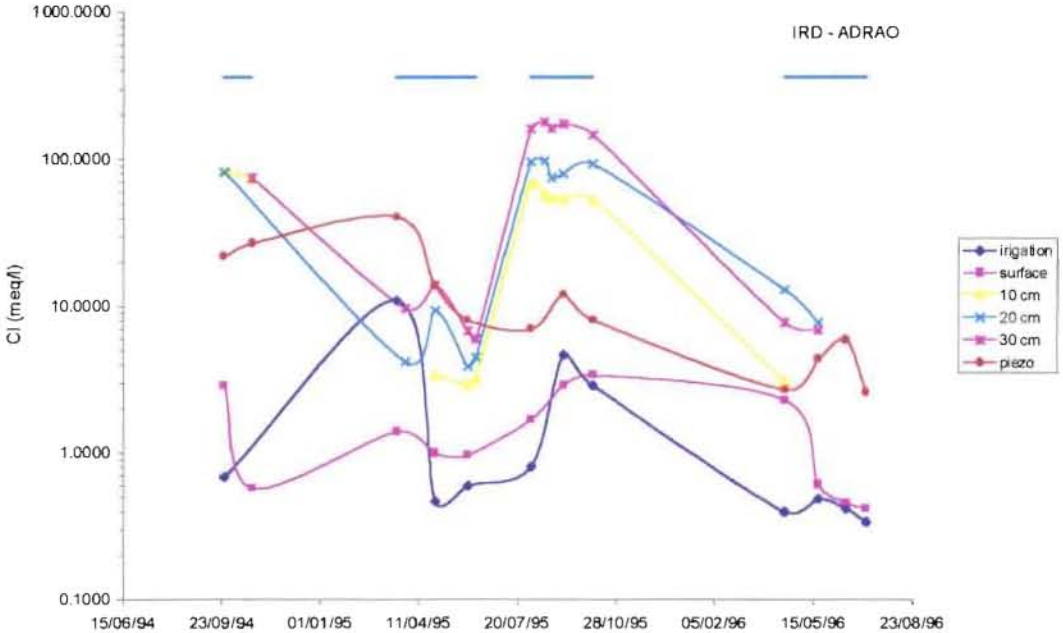


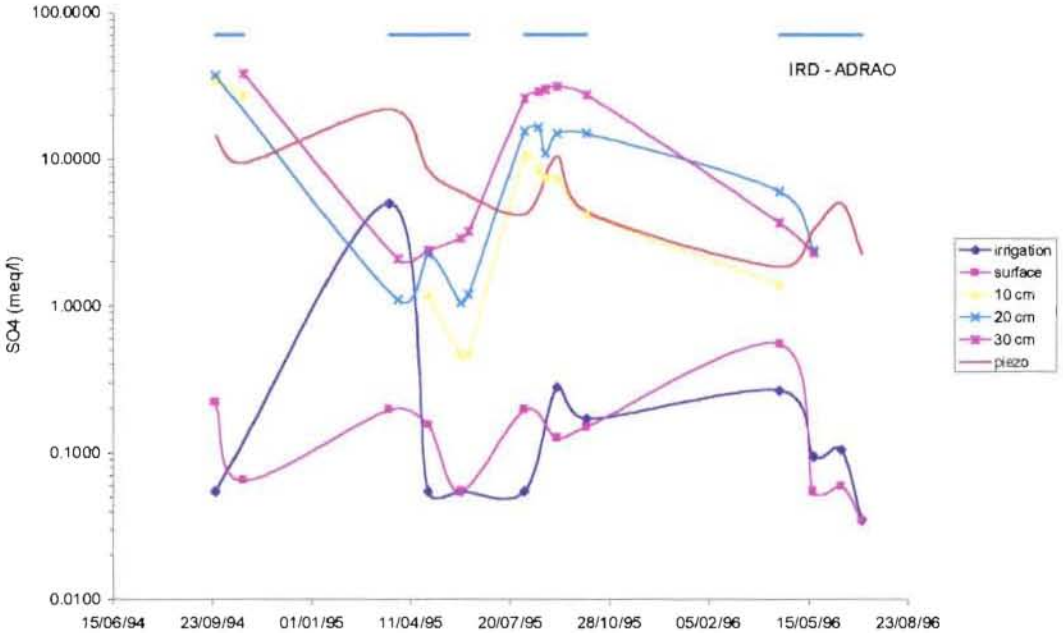


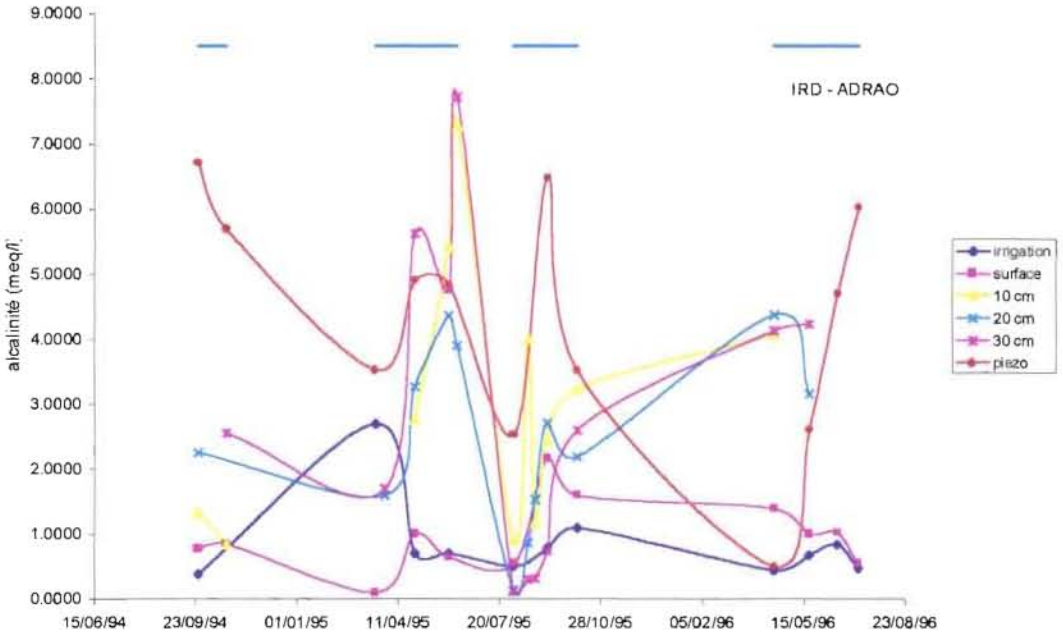
Jean-Luc MAEGHT

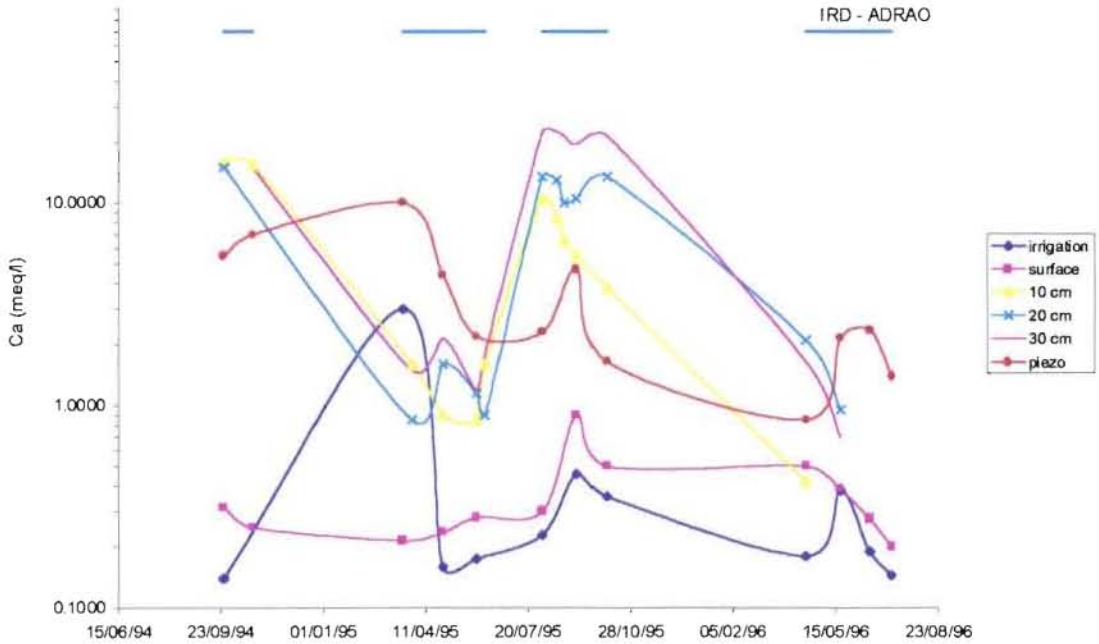
2. Site de Ndiaye

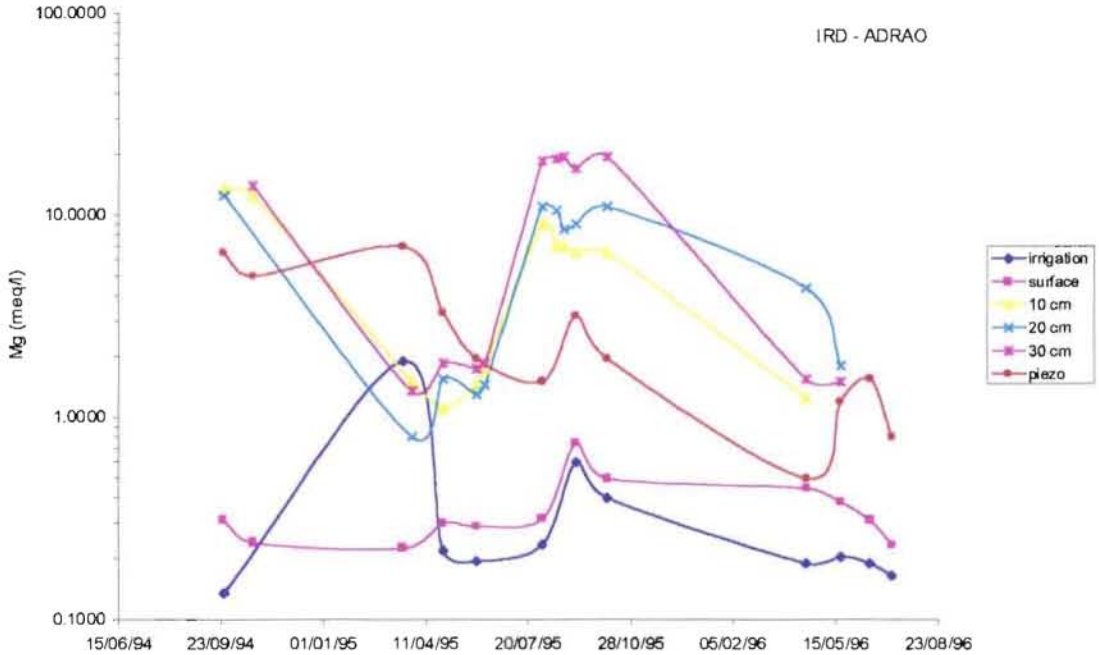
Il s'agit du site expérimental de l'ADRAO à Ndiaye, situé dans le delta de fleuve Sénégal. Le sol est essentiellement argileux sur les 60 premiers centimètres pour prendre une texture sablo-argileuse puis argilo-sableuse vers 110 cm. Dans ce profil de sol, la trace de la mangrove est encore très nette et elle se manifeste par la présence cristaux de gypse, d'iron-pipe et de jarosite. Ce site est également caractérisé par la présence d'une nappe salée proche de la surface (typique du Delta). L'eau d'irrigation prélevée dans le Lampsar est alcaline et légèrement chlorurée alors que l'eau de nappe présente un faciès marin sulfaté chloruré sodique et magnésien.
Lors de l'irrigation on observe un gradient ascendant des chlorures, sulfates, du sodium, magnésium et calcium depuis la nappe et les horizons intermédiaires vers la surface, suggérant une remontée depuis la nappe, puis on observe une descente de ces ions lors de périodes d'inter-culture. Pour l'alcalinité élément essentiel dans les apports par irrigation la tendance est moins nette. Il semble donc que la composition de l'irrigation n'a aucun effet chimique sur l'évolution du sol dans ce site. L'irrigation n'a qu'un effet physique conduisant à la remontée de la nappe, qui elle impose son faciès chimique en surface.
Les diagrammes d'équilibre montrent que la solution du sol est à l'équilibre avec la calcite dans les horizons supérieurs alors que les horizons plus bas sont proches de la saturation par rapport au gypse (l'écart à la saturation étant du à l'utilisation de l'équation de Debye Huckel pour le calcul des coefficients d'activité ionique, probablement inappropriée alors que la force ionique des solutions est de l'ordre 0.4). La représentation des solutions de ce site dans le diagramme de Riverside indique une évolution typique en voie saline neutre, bien que certains points dans le profil (essentiellement à 30 cm) indique également un risque sodique probablement lié à une dilution de la solution saline lors de l'irrigation. Cependant le risque principal est un risque de salinisation par accumulation de sels dans la rhizosphère. Il faut toutefois signaler que les travaux menés par l 'ADRAO montrent qu'en général sur les parcelles en riziculture la salinité globale diminue.

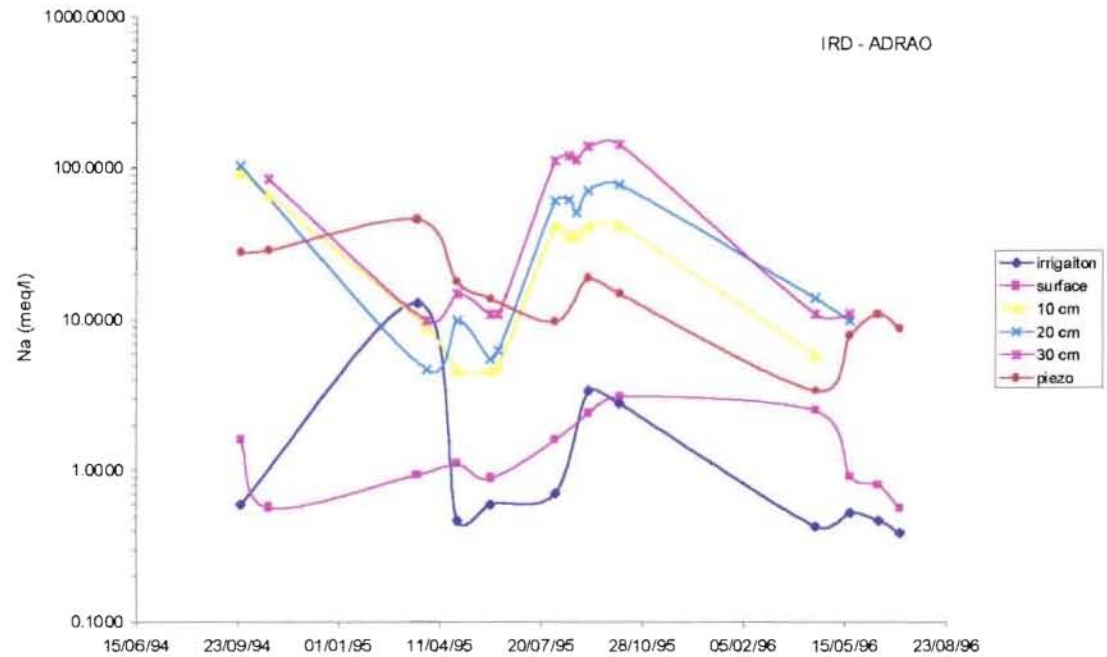

IRD - ADRAO
Cl (meq/l)
1000.0000
100.0000
10.0000
1.0000
0.1000
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo

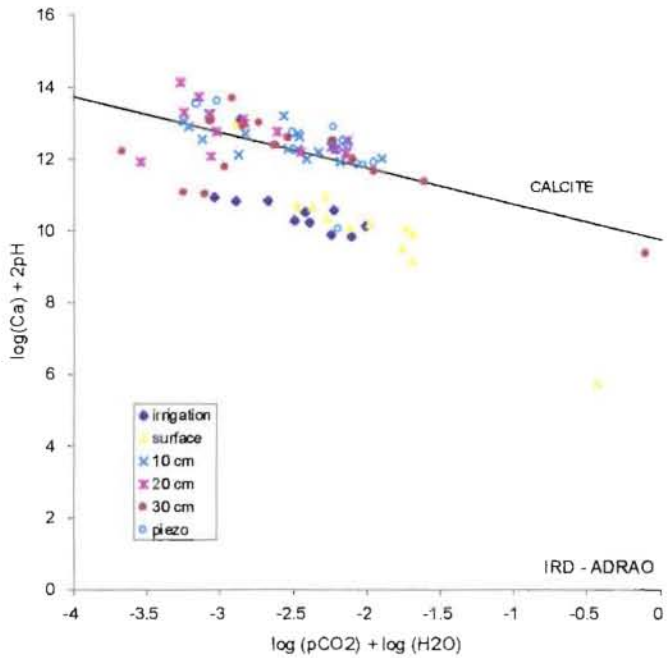

IRD - ADRAO
SO4 (meq/l)
100.0000
10.0000
1.0000
0.1000
0.0100
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo

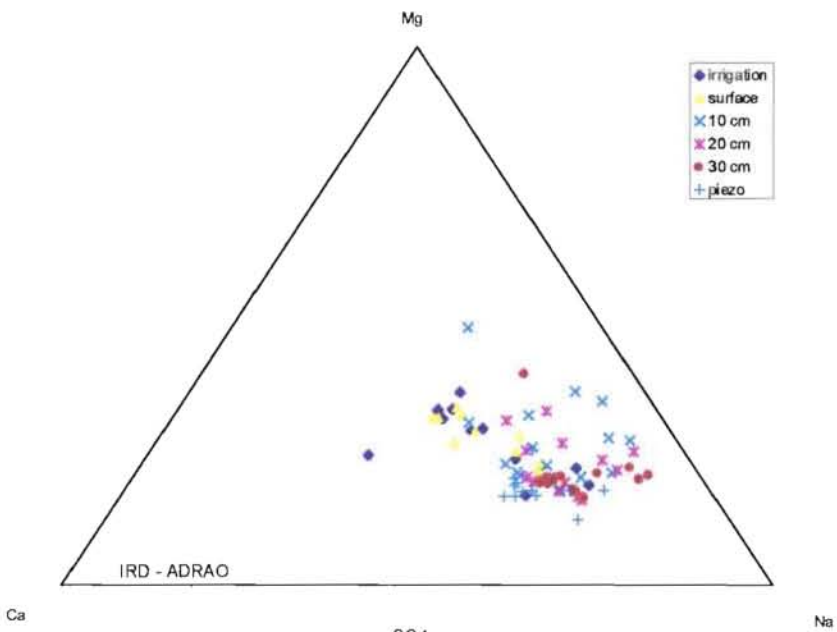

IRD - ADRAO
alcalinité (meq/l)
9.0000
8.0000
7.0000
6.0000
5.0000
4.0000
3.0000
2.0000
1.0000
0.0000
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo

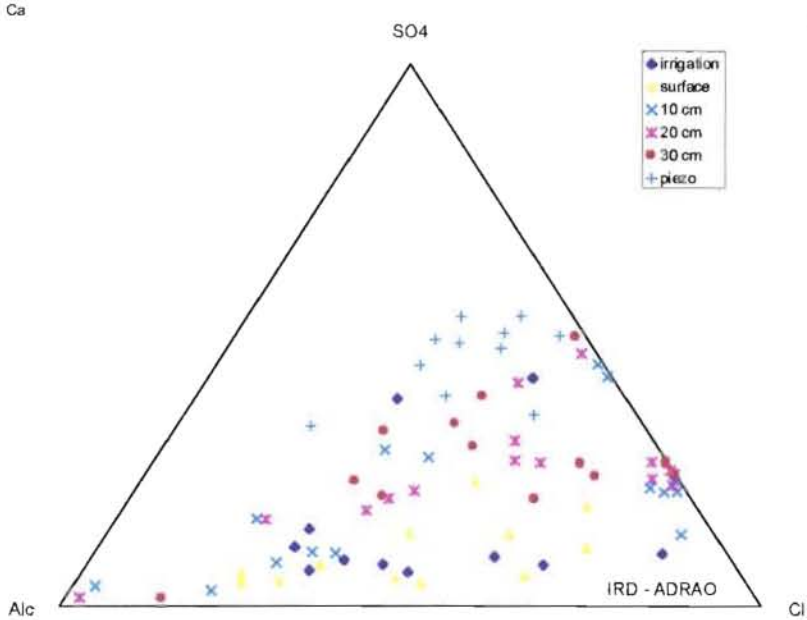

IRD - ADRAO
Ca (meq/l)
10.0000
1.0000
0.1000
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo


IRD - ADRAO
Mg (meq/l)
100.0000
10.0000
1.0000
0.1000
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo


IRD - ADRAO
Na (meq/l)
1000.0000
100.0000
10.0000
1.0000
0.1000
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigaiton
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo


CALCITE
log(Ca) + 2pH
log (pCO2) + log (H2O)
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo
IRD - ADRAO


Mg
Ca
Na
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo
IRD - ADRAO


SO4
Alc
Cl
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm
piezo
IRD - ADRAO

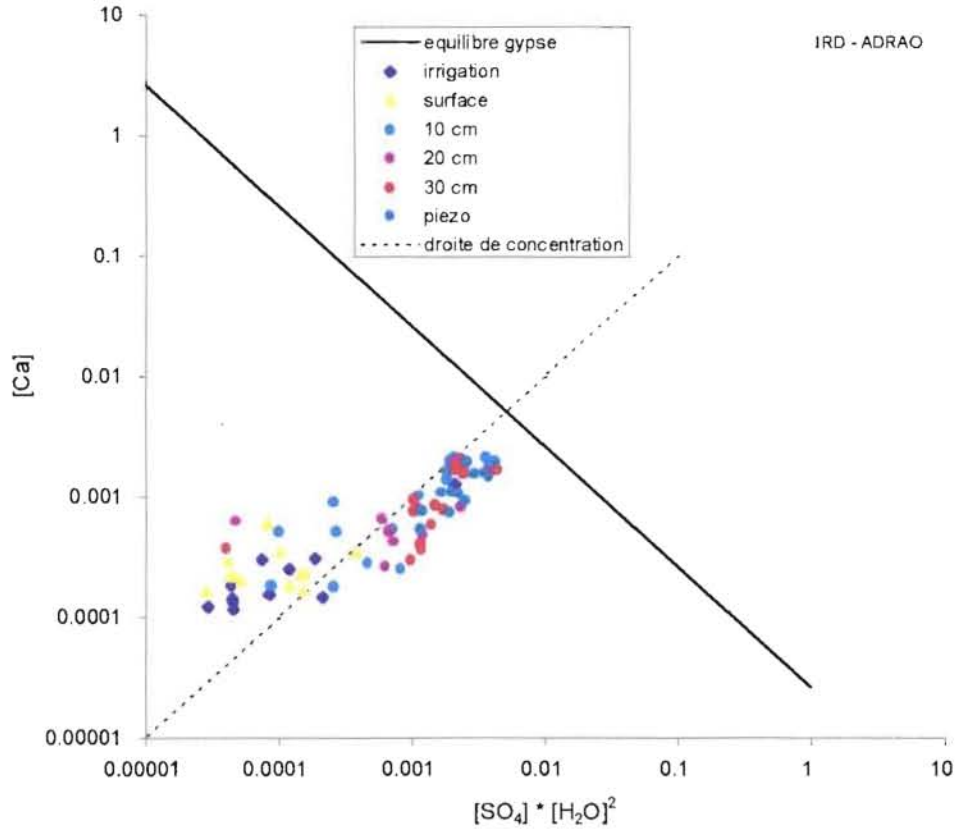
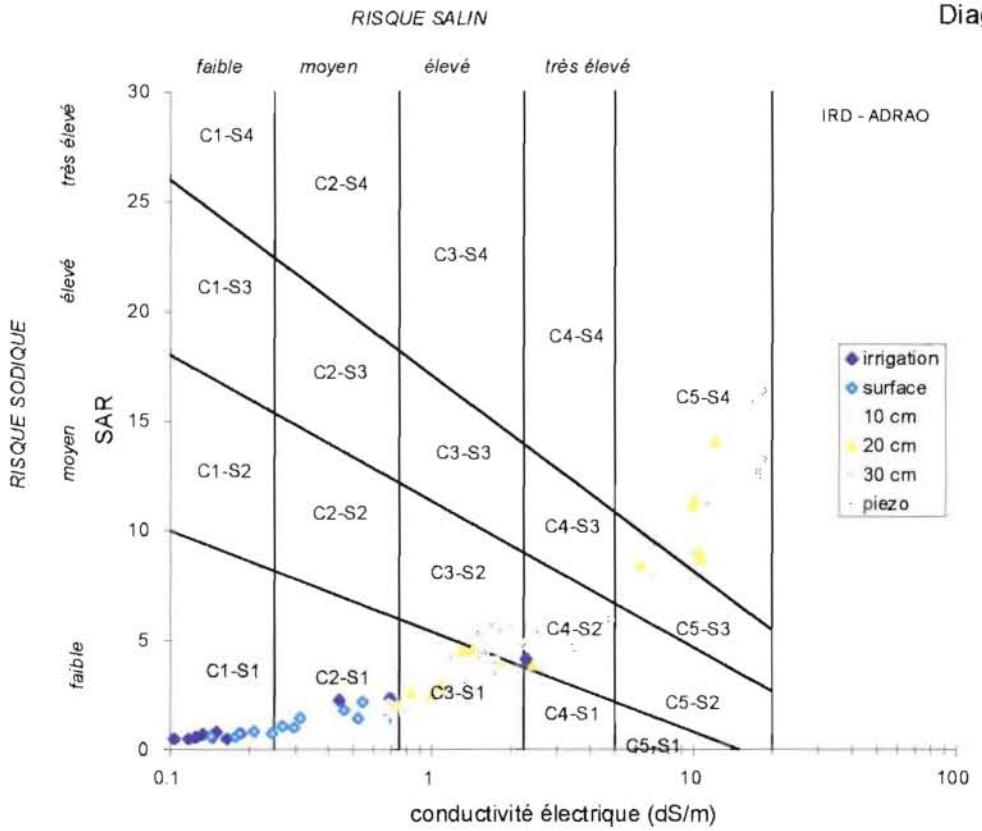


Diagramme de Riverside
Ndiaye



3. Le site de Fanaye

Le second site expérimental de l'ADRAO-ISRA est situé à Fanaye dans la moyenne vallée, et les parcelles sont irriguées à partir de l'eau du Ngallenka. . Le sol y est argileux (48 % d'argiles en surface et 55 % en profondeur) et se caractérise par un micro-relief en gilgaï en surface. On observe également une grande homogénéité sur près de 2 m le long desquels on ne distingue aucune transition nette. Les premiers centimètres de sol présentent une structure polyédrique, devenant massive et compacte vers le bas. Les conditions hydrodynamiques sont particulières dans la mesure où l'aquifère est profond (il n'a pas été atteint lors des sondages à la tarière à 6 m).

L'eau du Ngallenka présente un faciès carbonaté calci-magnésien très marqué. L'alcalinité résiduelle calcite est toujours positive et l'alcalinité calcite + silicate (ou carbonate) magnésien est souvent positive également. Comme pour le site de Donaye il existe donc un risque d'alcalinisation potentiel.

Lors de l'irrigation l'alcalinité, le calcium, le magnésium, les sulfates et le pH s'élèvent dans les horizons supérieurs, alors que les chlorures ont tendance à migrer vers le bas pour reprendre des valeurs élevées pendant l'inter-culture. L'alcalinité résiduelle calcite montre un gradient ascendant, mais c'est à 20 cm que l'alcalinité résiduelle calcite + silicate magnésien est la plus forte. Bien que les solutions des 30 premiers centimètres de sol soient systématiquement à saturation par rapport à la calcite et la magnésite, les valeurs de pH n'excèdent jamais 8.5. Par ailleurs les compositions des solutions du sol placées dans le diagramme de Riverside sont situées dans un domaine où théoriquement le risque sodique et faible. En effet, la capacité d'échange semble également jouer le rôle d'un tampon chimique important fournissant du calcium et du magnésium en grande quantité à la solution. En outre, l'absence de nappe permet une infiltration plus profonde de l'eau d'irrigation, limitant de ce fait sa concentration en surface et en même temps le risque d'alcalinisation.

En conclusion, bien que l'eau d'irrigation possède des propriétés alcalinisantes fortes, ce phénomène est limité d'une part par les propriétés physico-chimiques de ces sols qui développent une surface réactive extrêmement importante et d'autre part par les conditions hydrodynamiques permettant un écoulement libre des solutions vers la profondeur, sans remontées capillaires notables pendant les périodes d'inter-culture.

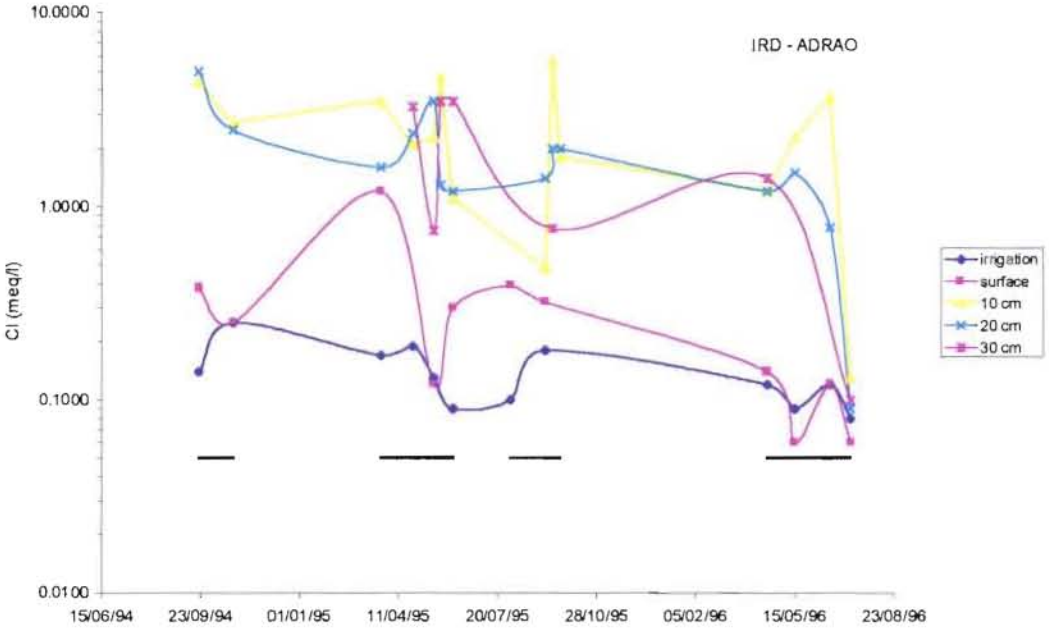
Complexe d'échange sur le sol de Fanaye.

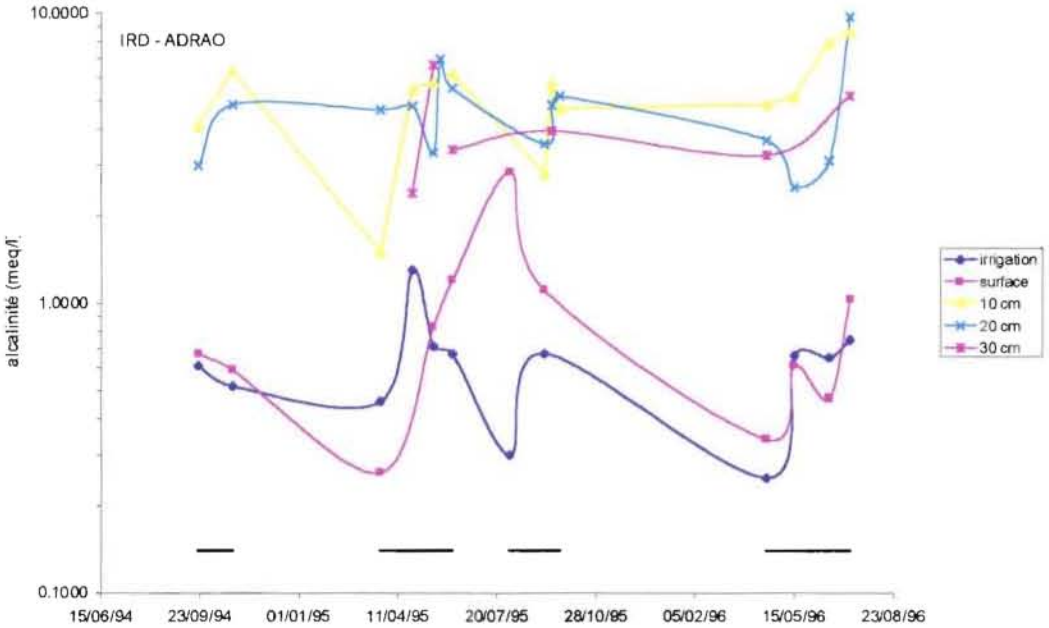
Ca	Mg	Na	K	CEC
		meq/100g		
12.3	8.22	1.94	0.3	21.53

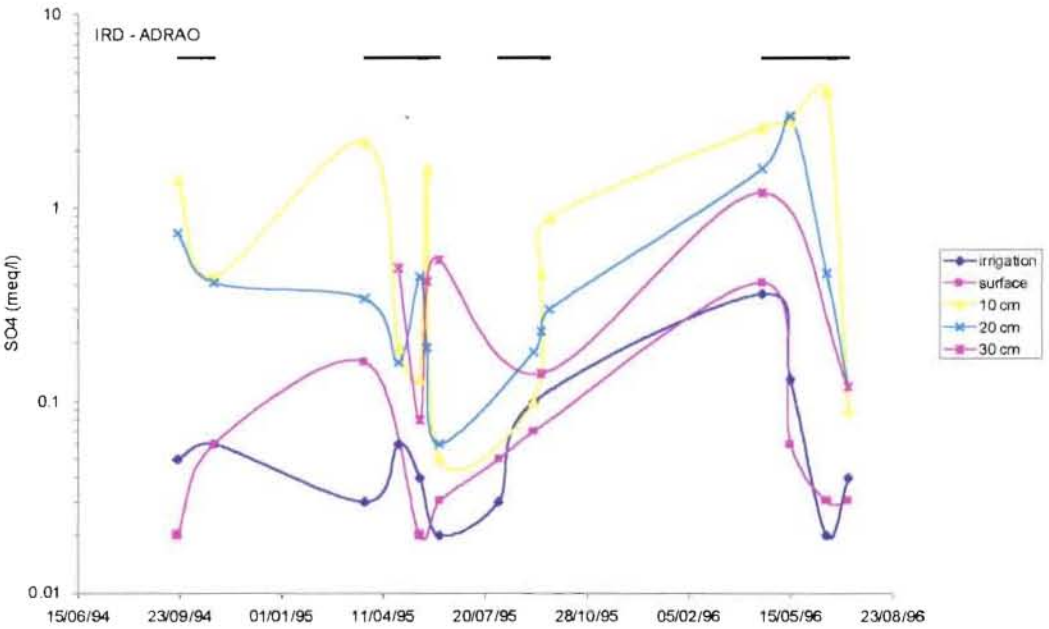
4. Conclusions

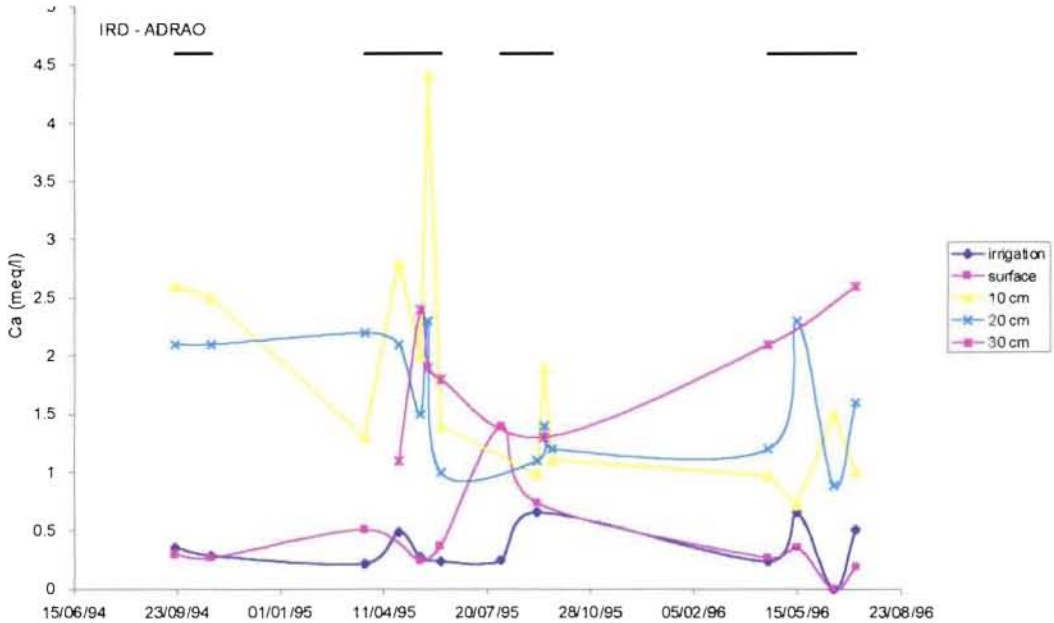
Les trois sites étudiés présentent des conditions hydrodynamiques et chimiques bien distinctes. Dans le delta le site Ndiaye est caractérisé par la présence d'une nappe, d'une part très proche de la surface et d'autre part dont le faciès chimique est extrêmement marqué par les dépôts marins. La contribution alcaline de l'eau d'irrigation est sans aucun effet sur l'évolution chimique du profil à court ou moyen terme. L'irrigation a un simple rôle mécanique permettant faire remonter le niveau de la nappe. Sur le site de Fanaye dans la moyenne vallée, malgré l'usage d'une eau d'irrigation très alcaline, l'absence de nappe permettant aux solutions de filtrer vers le bas et la forte capacité d'échange de ces sols, principalement saturée en calcium et magnésium, permet d'écarter à court terme le risque d'alcalinisation. Cependant si les conditions d'évolution géochimiques de ces sols risque de changer si toute fois au fil des années d'irrigation une nappe superficielle venait à s'installer.

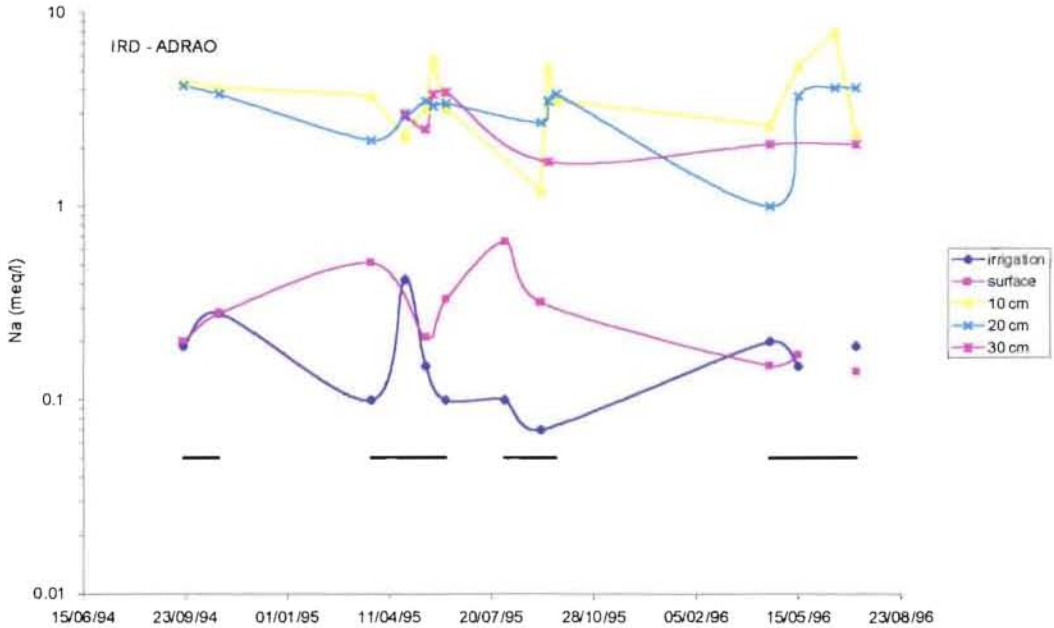
En fin sur le site de Donaye, on observe qu'à la faveur des cycles d'irrigation qu'a subi le sol, un stock d'alcalinité s'est constitué en surface. Cependant les rôles couplés de la nappe permettant de remonter des solutions au faciès salin neutre vers la surface et de la forte capacité d'échange de ces sols, jouent un rôle de tampon chimique dans le processus d'alcalinisation. Il faut néanmoins préciser que la réserve saline neutre tend à être évacuée (probablement vers le fleuve lors des grandes crues d'hivernage) et que de ce fait la menace d'une évolution vers un processus d'alcalinisation serait à envisager sérieusement.

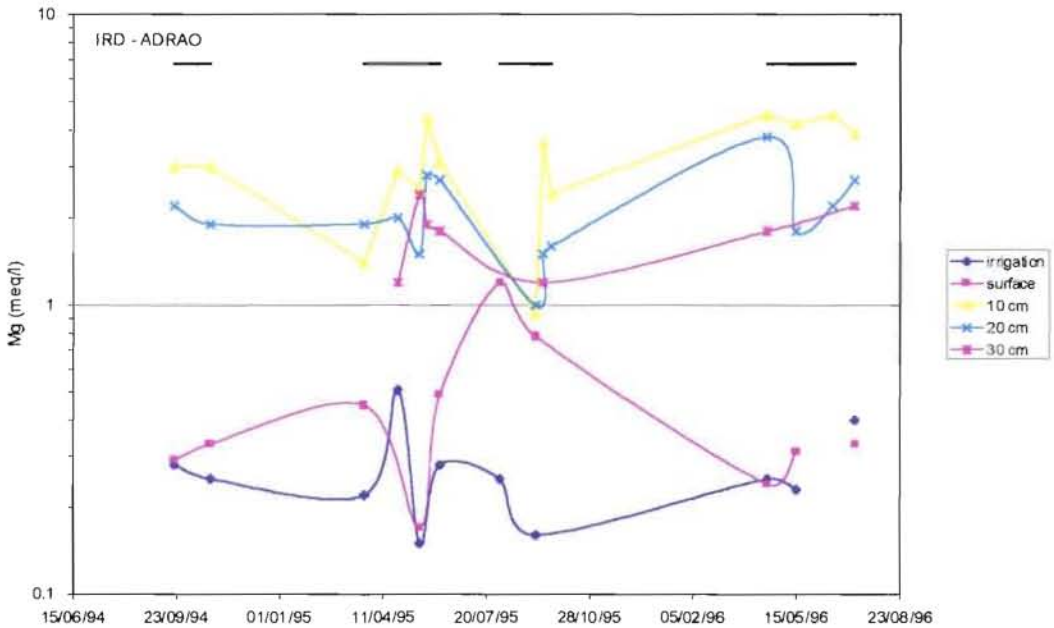

IRD - ADRAO
Cl (meq/l)
10.0000
1.0000
0.1000
0.0100
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm

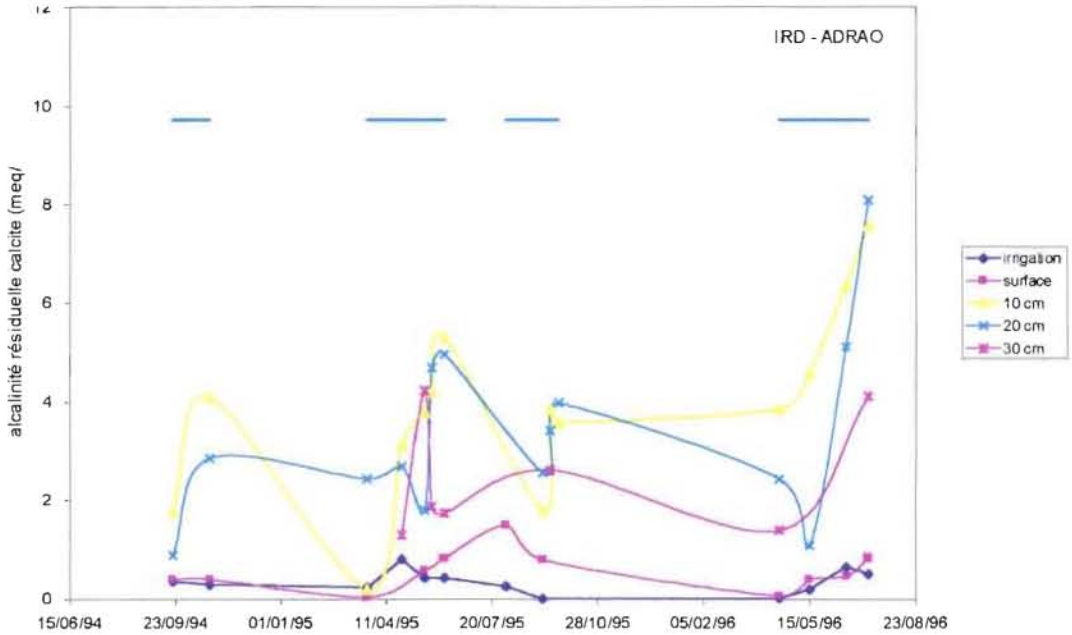

IRD - ADRAO
alcalinité (meq/l)
10.0000
1.0000
0.1000
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm

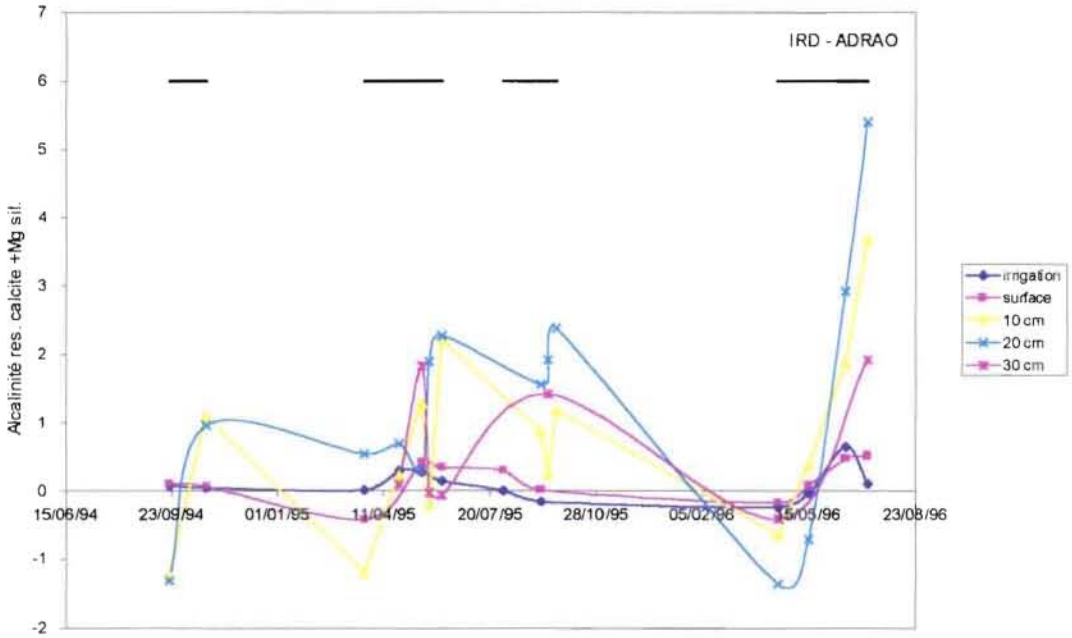

IRD - ADRAO
SO4 (meq/l)
10
1
0.1
0.01
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm

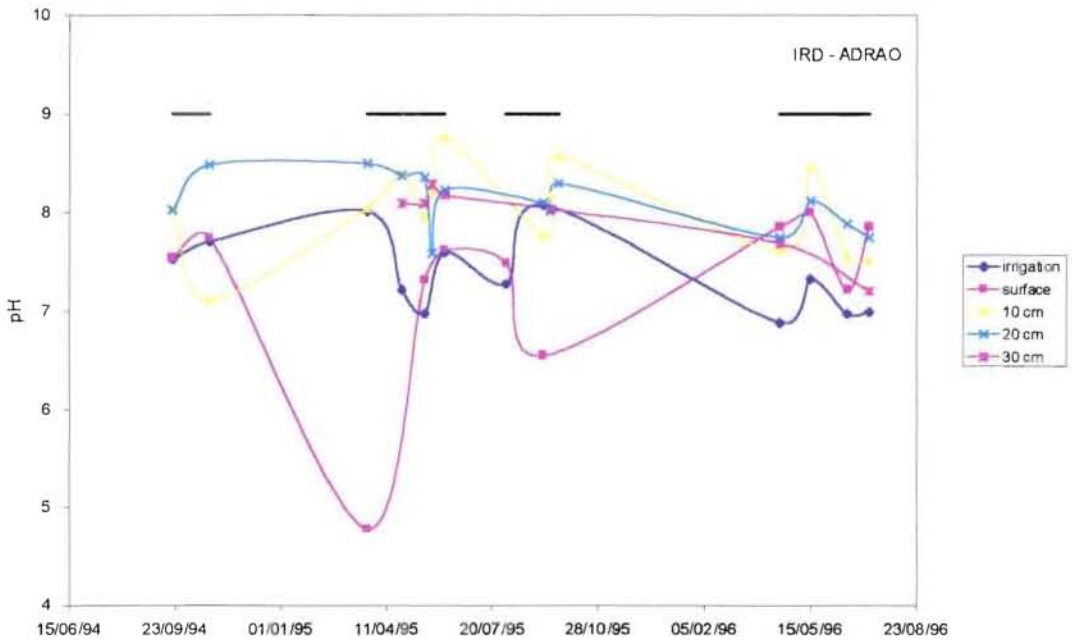

IRD - ADRAO
Ca (meq/l)
4.5
4
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm

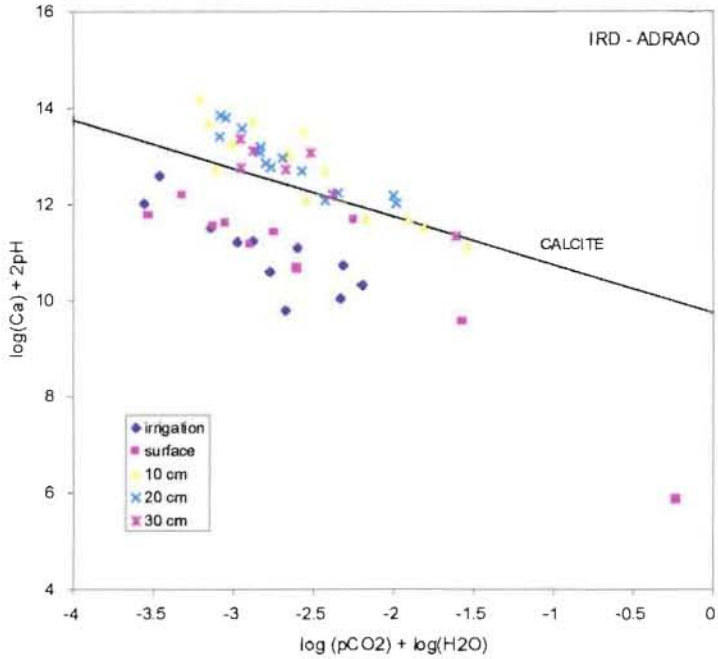

IRD - ADRAO
Na (meq/l)
10
1
0.1
0.01
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm

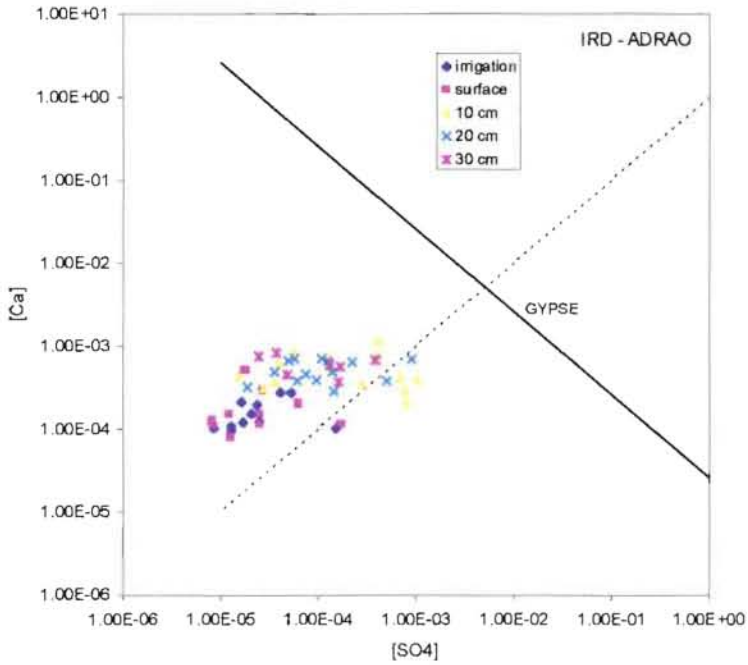

IRD - ADRAO
Mg (meq/l)
10
1
0.1
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm

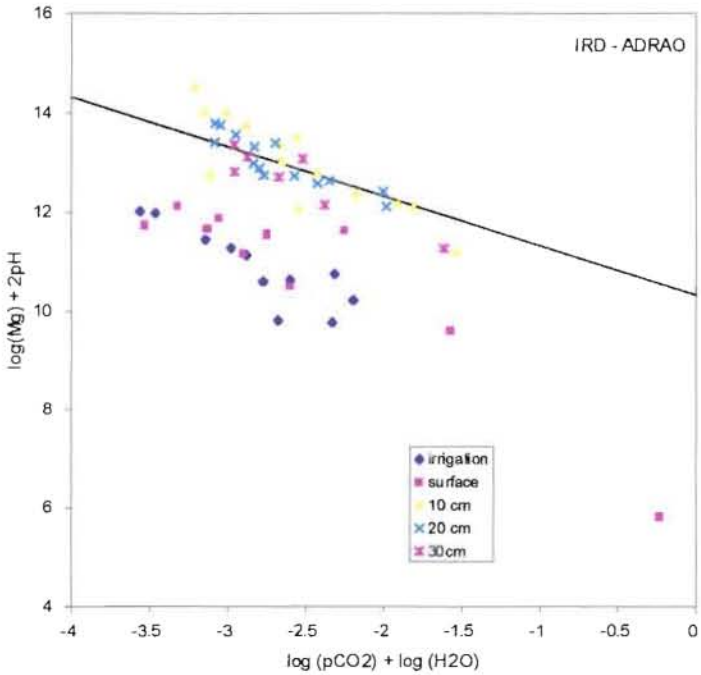

IRD - ADRAO
alcalinité résiduelle calcite (meq/
12
10
8
6
4
2
0
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm

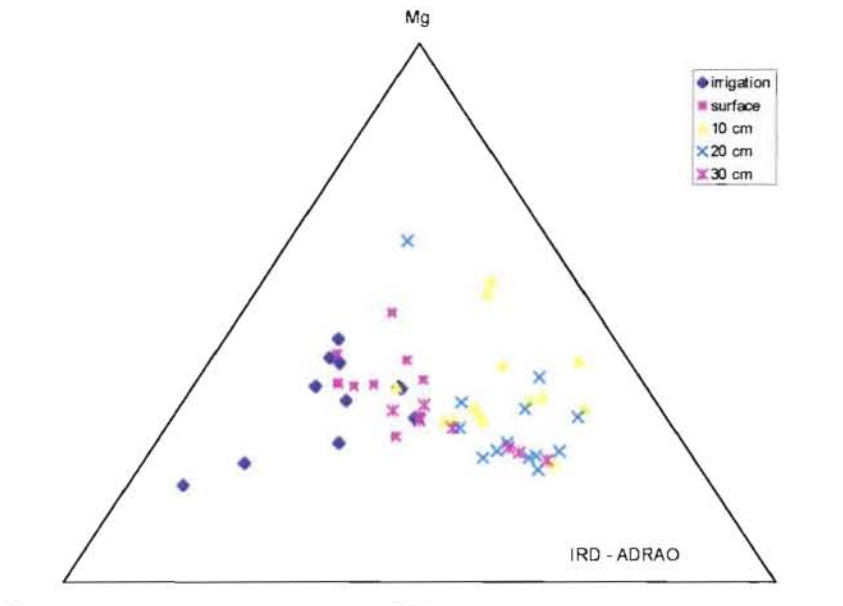

IRD - ADRAO
Alcalinité res. calcite +Mg sil.
7
6
5
4
3
2
1
0
-1
-2
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm


IRD - ADRAO
pH
10
9
8
7
6
5
4
15/06/94
23/09/94
01/01/95
11/04/95
20/07/95
28/10/95
05/02/96
15/05/96
23/08/96
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm


IRD - ADRAO
CALCITE
log(Ca) + 2pH
log (pCO2) + log(H2O)
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm


IRD - ADRAO
GYPSE
[Ca]
[SO4]
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30 cm


IRD - ADRAO
log(Mg) + 2pH
log (pCO2) + log (H2O)
irrigation
surface
10 cm
20 cm
30cm



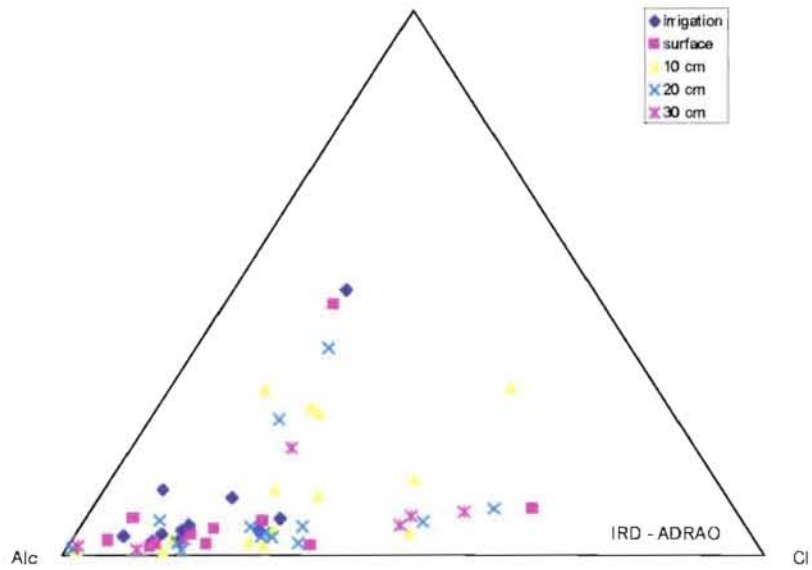
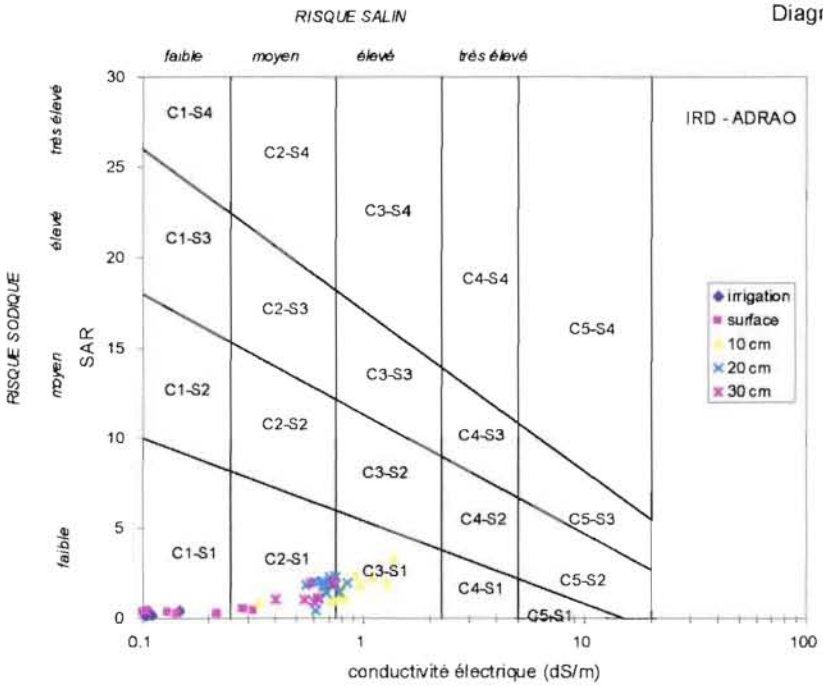


Diagramme de Riverside
Fanaye



Références bibliographiques :

FAVRE F. et P. BOIVIN – Evolution physico-chimique des sols irrigués en moyenne vallée du fleuve Sénégal. Compte rendu de la réunion de comité de pilotage de F. Favre (janvier, 1998)

FAVRE F., P. BOIVIN, D. TESSIER ET C. HAMMECKER (1999) – Ion transfers , iron reduction and mineralogical implications in fields : new results for soil and water quality management. Conférence Internationale sur l'Irrigation, Lausane

HAMMECKER C. et J.L. MAEGHT (1998) – Rapport d'activité PSI 1998

C. HAMMECKER, A. C. D. ANTONINO, J.L. MAEGHT, P. BOIVIN (1999) - Experimental study and numerical modelling of the water transfers in an irrigated plot in Northern Senegal : evidences of air entrapment. En préparation pour Soil Science

SAMBA DIENE R. (1998) – Riziculture et dégradation des sols en vallée du fleuve Sénégal : analyse comparée des fonctionnements hydrosalins des sols du delta et de la moyenne vallée en simple et double riziculture.